



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA CHEMICKÁ
FACULTY OF CHEMISTRY

ÚSTAV CHEMIE MATERIÁLŮ
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE

**REOLOGICKÉ VLASTNOSTI CHLADICÍCH KAPALIN PRO
OBRÁBĚNÍ KOVŮ**
FLOW PROPERTIES OF COOLANTS FOR METAL CUTTING

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Daniela Blašková

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Radka Bálková, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Číslo práce: FCH-DIP1331/2018
Ústav: Ústav chemie materiálů
Studentka: **Bc. Daniela Blašková**
Studijní program: Chemie, technologie a vlastnosti materiálů
Studijní obor: Chemie, technologie a vlastnosti materiálů
Vedoucí práce: **Ing. Radka Bálková, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

Název diplomové práce:

Reologické vlastnosti chladicích kapalin pro obrábění kovů

Zadání diplomové práce:

U vybraných chladicích kapalin pro obrábění kovů stanovit změnu viskozity v závislosti na koncentraci, teplotě a úhlové rychlosti. Viskozitu proměřit alespoň u jedné chladicí kapaliny užívané v provozu po dobu jednoho užitného cyklu a výsledky dát do korelace se změnou koncentrace, teploty popřípadě tvrdosti vody.

Termín odevzdání diplomové práce: 10.5.2019

Diplomová práce se odevzdává v děkanem stanoveném počtu exemplářů na sekretariát ústavu. Toto zadání je součástí diplomové práce.

Bc. Daniela Blašková
student(ka)

Ing. Radka Bálková, Ph.D.
vedoucí práce

doc. Ing. František Šoukal, Ph.D.
vedoucí ústavu

V Brně dne 31.1.2019

prof. Ing. Martin Weiter, Ph.D.
děkan

ABSTRAKT

Boli merané tokové vlastnosti dvoch typov procesných a čistých chladiacich kvapalín (A a B), používaných pri obrábaní kovov. Z procesu boli odobraté štyri kvapaliny vždy po mesiaci používania. Všetky kvapaliny boli merané pri teplote 25 °C o obsahu olejovej emulzie 4 %. Tokové krivky čistých kvapalín boli navyše merané pri teplote 30, 35, 40, 45 a 50 °C o koncentráciách 2, 4, 6 a 8 %. Reologické meranie bolo prevedené na geometrii sústredných valcov. Pre procesnú kvapalinu A bola meraná mikrobiálna aktivita a bol zisťovaný obsah aditív (termogravimetricky). Obe procesné kvapaliny vykazovali ne-Newtonovské správanie. Viskozita kvapalín mierne rástla so šmykovou rýchlosťou ($10\text{--}100\text{ s}^{-1}$) a mierou znečistenia. I keď znečistenie bolo percentuálne približne rovnaké, zmena viskozity sa u oboch typov kvapalín líšila. U čistých kvapalín viskozita rástla s rastúcou koncentráciou a klesala s rastúcou teplotou, výnimkou však bola kvapalina A, ktorá v závislosti na teplote vykazovala jednak šmykové zriedenie, šmykové spevnenie, aj Newtonovské chovanie a to u koncentrácie 6 a 8 %. Merania preukázali, že miera znečistenia procesných kvapalín nemá zásadný vplyv na viskozitu a tokové vlastnosti, má však vplyv na účinnosť chladiacej kvapaliny. Znečistenie spôsobuje zriedenie, môže dochádzať aj k čiastočnému rozkladu olejovej zložky ale predovšetkým sa výrazne zvyšuje mikrobiálna aktivita, spôsobujúca kožné problémy obsluhy. Odporučiť možno špecifický kontrolný test pre prítomnosť baktérií.

ABSTRAKT

The flow properties of two types of operating and clean coolants (A and B) were measured, both used in metalworking. Four samples of both operating liquids were sampled from the process monthly (from the beginning to the end of its use). All liquids were measured at 25 °C with an oil emulsion content of 4%. In addition, flow curves of pure cooling emulsions with concentration of coolant 2, 4, 6 and 8% were measured at 30, 35, 40, 45 and 50 °C. Rheological measurement was performed at geometry of concentric cylinders. Microbial activity and content of additives (Thermogravimetry) was determined in operating liquid A. Both operating liquids exhibited non-Newtonian behavior. Viscosity increased with the shear rate ($10\text{--}100\text{ s}^{-1}$) and impurity level. Although the amount of impurity was approximately the same in both liquids, viscosity varied. For pure liquids, the viscosity increased with increasing concentration and decreased with increasing temperature, except for liquid A with concentration of coolants 6 and 8%, which, depending on the temperature, exhibited both shear thinning, shear thickening and Newtonian behavior. The results shown that impurity level of operating liquids has only minor effect on viscosity and flow properties, but it had an effect on cooling effect. Impurities diluted operating liquids, partial decomposition of the oil component may occur, but in particular, microbial activity causes skin problems of staff. Recommended is to introduce a specific control test for the presence of bacteria.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Chladiace kvapaliny, olejová emulzia, tokové vlastnosti, ne-Newtonovské kvapaliny, viskozita, mikrobiálna aktivita

KEYWORDS

Cooling liquids, oil emulsion, flow properties, non-Newtonian liquids, viscosity, microbial activity

BLAŠKOVÁ, D. *Reologické vlastnosti chladicích kapalin pro obrábění kovů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2019. s. Vedúca diplomovej práce Ing. Radka Bálková, PhD.

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som diplomovú prácu vypracovala samostatne a použité literárne zdroje som správne a úplne citovala. Diplomová práca je z hľadiska obsahu majetkom Fakulty chemickej VUT v Brne a môže byť využitá ku komerčným účelom len so súhlasom vedúceho diplomovej práce a dekana FCH VUT.

.....
podpis študenta

Podakovanie:

Veľmi sa chcem poďakovať mojej vedúcej práce pani doktorke Ing. Radke Bálkovej, Ph.D. za odborné vedenie mojej práce a za veľkú dávku trpezlivosti, zhovievavosti a času, ktorý mi venovala počas riešenia danej problematiky. Poďakovanie taktiež patrí Ing. Andrejovi Smetankovi za poskytnutie vzoriek a cenných informácií z výrobného procesu.

OBSAH

1. ÚVOD.....	7
2. TEORETICKÁ ČASŤ.....	8
2.1 Chladiace kvapaliny	8
2.1.1 Rozdelenie chladiacich kvapalín.....	9
2.2 Vodné emulzné chladiace kvapaliny	10
2.2.1 Problémy emulzných chladiacich kvapalín.....	12
2.2.2 Kontrola chladiacej kvapaliny.....	13
2.2.3 Recyklácia a opätovné použitie chladiacich kvapalín.....	16
2.3 Reológia.....	17
2.3.1 Viskozita	18
2.3.2 Newtonovské kvapaliny	19
2.3.3 Ne-Newtonovské kvapaliny	19
2.4 Meranie tokových vlastností.....	22
2.4.1 Geometrie pre meranie tokových vlastností.....	23
2.4.2 Reológia multifázových kvapalín	24
2.5 Stanovenie obsahu nízkej koncentrácie olejov vo vode.....	27
3. EXPERIMENTÁLNA ČASŤ	28
3.1 Materiál.....	28
3.1.1 Príprava vzoriek	29
3.2 Meranie	29
3.2.1 Morfológia emulzie pod optickým polarizačným mikroskopom.....	29
3.2.2 Obsah vody, ďalších nízkomolekulárnych látok a nerozložiteľný podiel v emulziách	29
3.2.3 Stanovenie tokových vlastností emulzií.....	29
4. VÝSLEDKY A DISKUSIA	31
4.1 Morfológia emulzie pod optickým polarizačným mikroskopom.....	31
4.2 Mikrobiálny rozbor	34
4.3 Stanovenie obsahu nízkej koncentrácie olejov vo vode.....	35
4.4 Stanovenie tokových vlastností emulzií.....	37
5. ZÁVER.....	47
6. POUŽITÁ LITERARÚRA	48

1. ÚVOD

Procesné kvapaliny tvoria dôležitú súčasť mnohých priemyselných odvetví. Predložená práca sa zaoberá charakterizáciou chladiacich kvapalín používaných pre obrábanie kovov z hľadiska tokových vlastností v závislosti na koncentrácií olejovej zložky, teplote a miere procesného znečistenia. Charakterizovaná bola tiež teplotná odolnosť, obsah aditív a mikrobiálna aktivita. Práca bola motivovaná problémami počas používania chladiacej kvapaliny vo výrobe, ktoré sa prejavili koróziou obrobku a kožnými problémami obsluhy, ktorá prichádza do priameho styku s kvapalinou. Cieľom práce bolo postihnúť mieru znečistenia a jej vplyv na tokové vlastnosti. Testované boli dva typy procesnej kvapaliny (A a B), ktoré sa líšili predovšetkým v miere koróznej aktivity, alkalite, teda v zložení účinnej zložky, ktorou je tu bližšie nedefinovaný minerálny olej. Procesná kvapalina bola odoberaná po jednom mesiaci používania a porovnaná s čistým roztokom chladiacej kvapaliny.

Reologické testy boli prevedené na reometre s geometriou typu valec-valec. Všetky kvapaliny boli merané pri teplote 25 °C o obsahu olejovej emulzie 4 %. Tokové krivky čistých kvapalín boli navyše merané pri teplote 30, 35, 40, 45 a 50 °C o koncentrácií 2, 4, 6 a 8 %. Pre procesnú kvapalinu A bola preverená mikrobiálna aktivita a termogravimetricky bola zisťovaná teplotná stabilita a obsah aditív.

Práca je štandardne rozdelená do troch hlavných kapitol (teória, experiment a výsledky). Teória oboznamuje s definíciou chladiacej kvapaliny, jej typmi a vlastnosťami. Uvedené sú tiež problémy s jej používaním a odporúčenie možných riešení. Ďalšia časť sa zaoberá základom teórie reológie, typov kvapalín, merania viskozity zdanlivej i dynamickej.

Experimentálna časť popisuje použité materiály, postup prípravy vzoriek k meraniu a podmienky testovania.

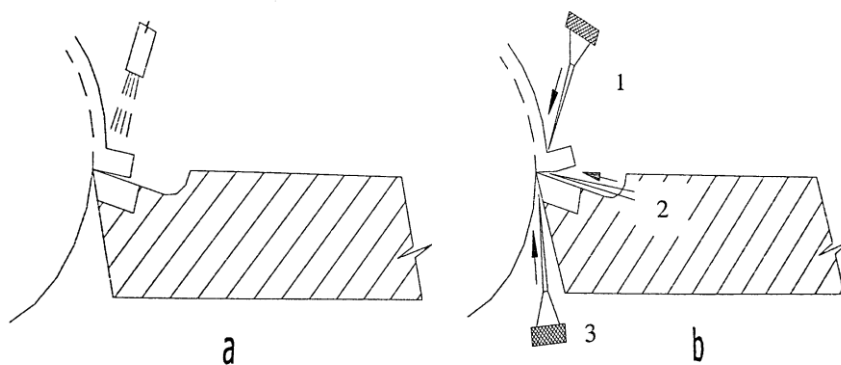
Kapitola výsledky a diskusia predkladá tokové krivky a závery z nich plynúce, hodnotí mikrobiálnu aktivitu, teplotnú stálosť, kroky rozkladu a obsah aditív.

2. TEORETICKÁ ČASŤ

2.1 Chladiace kvapaliny

Pri obrábaní ocele a iných kovov je nevyhnutné použitie chladiacej kvapaliny, pretože obrábaný kov i obrábací nástroj sa zahrieva na vysokú teplotu, predovšetkým u kovov s vysokou teplotou tavenia. Chladiace kvapaliny nemôžu zabrániť vytváraniu tepla a nemajú priamy prístup do zón, kde je generované teplo, ale vodou riediteľné chladiace kvapaliny znižujú teplotu v mieste styku nástroja a obrábaného kusu, odvádzajú triesku z miesta obrábania a súbežne znižujú trenie medzi nástrojom a obrobkom. Voda sama o sebe však je veľmi zlým mazivom, ale po zmiešaní s olejom za vzniku emulzií alebo prípadne s vodorozpustnými uhľovodíkmi vznikajú lubrikanty o požadovaných vlastnostiach. Okrem prenosu tepla je u vody významná jej nehorľavosť. Počas aplikácie vo výrobnom procese je voda z emulzie vylúčená a jej výkon je blízky výkonu čistého minerálneho oleja. V kovoobrábaní sa chladiace kvapaliny nazývajú aj ako kvapaliny rezné [1–3].

Pri obrábaní kovov majú najväčšie zastúpenie rezné oleje a olejové emulzie (vodou miešateľné obrábacie prostriedky), na ktoré sú kladené okrem základných požiadaviek aj požiadavky z hygienického, ekologického a ekonomického hľadiska. Volia sa pre intenzívnejší odvod vznikajúceho tepla. Rezná kvapalina vstupuje medzi povrch triesky a nástroja (obr. 1) za vznikajúcich ochranných povlakov na nástroji a obrobku, ktoré vplývajú na intenzitu opotrebovania nástroja. Atómy na povrchu kovu priťahujú atómy alebo molekuly prostredia a vytvárajú s nimi väzby. Na povrchu kovu tak vzniká tenká adsorpčná vrstva meniaci vlastnosti povrchu. Pri súvislej vrstve je súčiniteľ trenia závislý od jej vlastností a nie od vlastností povrchu. Povrchovo-aktívne látky vnikajú do mikrotrhlín materiálu, pôsobia na steny trhlín tlakom, čím znižujú súdržnosť materiálu a uľahčujú deformáciu. Teplo vznikajúce v primárnom šmykovom pásme sa väčšou časťou odvádza do triesky a menšou do obrábaného kusu. Chladiace kvapaliny na báze vody účinne znižujú ich teplotu. Chladenie triesky má však malý význam, no udržiavanie nízkych teplôt obrábaného kusu je nevyhnutné pre rozmerovú presnosť [1–3].



Obr. 1 Náčrt (a) voľného prívodu chladiacej kvapaliny a (b) pretlakový prívod reznej kvapaliny 1 – na obrábací materiál, 2 – na čelo nástroja, 3 – na chrbát nástroja [3]

Správna voľba kvapaliny zvyšuje produktivitu obrábacích strojov, znižuje opotrebovanie nástrojov a energetické zaťaženie, skvalitňuje produkciu a umožňuje zvýšiť rezné parametre, ktorými sú rezná rýchlosť, rezná sila, krútiaci moment a iné [3]. Okrem kvalitatívnych parametrov chladiacej kvapaliny však proces obrábania do veľkej miery ovplyvňujú taktiež parametre prostredia, ktoré obklopuje reznú oblasť. Tú tvorí okolitý vzduch, kvapaliny, plyny a nasýtené pary. Vytvorené prostredie mení vlastnosti povrchových vrstiev obrábaného a rezného materiálu, čím výrazne ovplyvňuje vzájomné pôsobenie povrchov. Fyzikálne a chemické vlastnosti rezného prostredia podstatne ovplyvňujú deformáciu spracovávaného materiálu a jeho trenie po reznom kline, odvádzajú teplo z miesta rezu, vplývajú na trvanlivosť reznej hrany, spotrebu energie a kvalitu povrchu obrábaného materiálu [3, 4].

2.1.1 Rozdelenie chladiacich kvapalín

Druhy rezných kvapalín sú podmienené účelom ich používania a požiadavkám, ktoré sú na ne kladené. Podľa prevádzkových podmienok kladených na kvapaliny je možné rozdelenie na kvapaliny s prevažujúcim chladiacim účinkom (vodou miešateľné) a na kvapaliny s prevažujúcim mastiacim účinkom, ktoré majú schopnosť absorbovať vysoké tlaky a vykazujú nízku alebo žiadnu penivosť (vodou nemiešateľné) [3].

Podľa normy ČSN 22 0131, ktorá už nie je v platnosti, sa rezné kvapaliny delili na:

- vodné roztoky,
- ropné látky používané pre rezné kvapaliny:
 - vodné emulzie emulgačných olejov a masťov,
 - ropné oleje bez prísad,
 - rezné oleje s prísadou masťných látok (živočíšneho alebo rastlinného pôvodu),
 - rezné oleje s chemickými prísadami, prípadne i masťnými látkami,
- koncentráty vysokotlakových prísad,
- masťné látky živočíšneho alebo rastlinného pôvodu,
- syntetické kvapaliny.

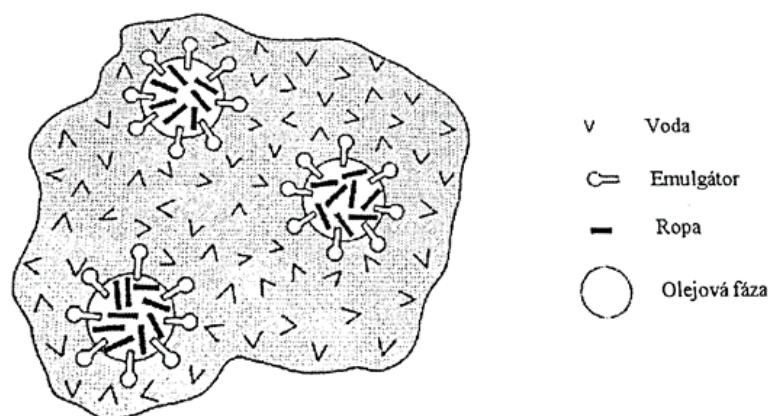
V súčasnosti je uprednostňované jednoduchšie rozdelenie kvapalín podľa Leisederana na:

- rezné kvapaliny *s vodou miešateľné*, kam patria:
 - vodné roztoky (syntetické kvapaliny a polosyntetické kvapaliny),
 - emulzné kvapaliny
- rezné kvapaliny *s vodou nemiešateľné*, ktoré sú:
 - minerálne,
 - prírodné (na báze živočíšnej a rastlinnej),
 - syntetické oleje,
 - iné mastiace látky [3].

2.2 Vodné emulzné chladiace kvapaliny

Emulzia je disperznou sústavou, tvorená dvomi vzájomne nemiešateľnými kvapalinami. Jedna kvapalina je rozptýlená v druhej vo forme malých kvapiek. Kvapalina tvoriaca kvapky predstavuje disperznú fázu a druhá, vonkajšia je disperzným prostredím. Pri obrábaní kovov je používaný typ emulzie, kde minerálny olej je fázou disperznou a voda disperzným prostredím (olej je jemne rozptýlený vo vode – do určitej miery sa jedná o spojenie vlastností vody a mazacích olejov) [3].

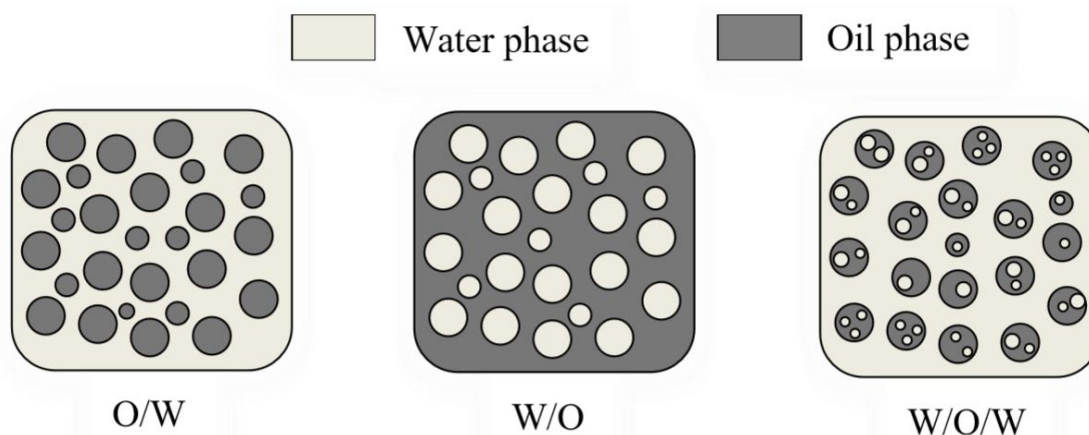
So stúpajúcim nárokom na výkon rezania rastie aj podiel oleja v emulzii. Emulzia môže byť dosiahnutá miešaním dvoch kvapalín s rozdielnym pomerom. Takto pripravená emulzia sa stáva nestabilnou a po krátkom časovom úseku sa zložky od seba oddelia. Typický pomer oleja ku vode je 1 : 10 alebo 1 : 60. Pre vodné emulzie sú preto dôležitou súčasťou emulgátory zvyšujúce ich stabilitu. Sú absorbované na rozhraní kvapalných fáz, kde znižujú medzipovrchové napätie a na povrchu kvapiek vytvoria ochrannú vrstvu zabráňujúcu opätovnému spájaniu kvapiek a následnému oddeleniu kvapalných fáz (obr. 2). Vplyvom dvojpólového charakteru molekuly emulgátora je monomolekulárny povlak na rozhraní rovnomerný. Emulgátor určuje vlastnosti a stabilitu emulzie a je podstatnou zložkou pre jej samotnú tvorbu [1, 3, 5].



Obr. 2 Náčrt štruktúry emulznej chladiacej kvapaliny [3]

Emulzie je možné rozdeliť (obr. 3) na základe polarít disperzného prostredia a dispergovanej látky na:

- voda v oleji (W/O) – spojitou fázou sú zvyčajne hydrofóbne látky, akými sú oleje a dispergovanou fázou je voda. Pozostávajú z rozpúšťadla, povrchovo aktívnej látky a vody. Ich stabilita je zaistená prírodnými povrchovo aktívnymi látkami ako živice a asfaltény,
- olej vo vode (O/W) – dispergovanou fázou je olej a voda disperzným médiom alebo fázou kontinuálnou. Ich používanie v praxi je častejšie a sú označované ako reverzné emulzie,
- komplexné emulzie (viacnásobné emulzie, W/O/W) – považované za emulzie emulzií, kedy prvým typom je voda v oleji vo vode a druhým olej vo vode v oleji. Tieto emulzie sú stabilizované použitím kombinácie hydrofilných a hydrofóbných povrchovo aktívnych látok [6].



Obr. 3 Schéma jednotlivých druhov emulzií [6]

K príprave emulzií sú využívané ione génné a neione génné emulgátory. Medzi ione génné emulgátory zaraďujeme soli alkalických kovov, soli mastných a nafténových kyselín a sulfonáty mastných alkoholov. Najčastejšie využívanými neionogénnymi emulgátormi sú syntetické a patria k nim deriváty polyethylenoxidu. Ďalšími významnými prísadami sú:

- inhibítory korózie (sú dôležitou súčasťou emulzií; používajú sa na podporu protikoróznej ochrany obrobkov a obrábacích strojov; pre tento účel sú využívané alkanolamíny, sulfonáty, amidy mastných kyselín, mydlá karboxylových kyselín a organické zlúčeniny bóru [7]),
- stabilizátory (alkoholy, glykol),
- vysokotlakové (EP – Extreme Pressure) prísady,
- prísady proti peneniu (základnou zložkou je silikón).

Čiastočne syntetické emulzie sa líšia od emulzií klasických tým, že obsahujú prísady povrchovo aktívnych prvkov, aktivujúce minerálne oleje emulgované vo vode a zvyšujú tak mastiaci a rezný účinok emulzií. Povrchovo aktívne látky aktivovaných emulzií obsahujú síru, chlórové deriváty, vysokomolekulárne kyseliny a étery vo forme mydla. Okrem účinku aktivácie plnia aj funkciu emulgátora. Pri sťažených podmienkach rezania sa na zníženie trenia pridáva 0,1–1,0 % koloidného grafitu [3].

Chladiaci účinok emulzie závisí na jej koncentrácii (2–10 %). S rastúcou koncentráciou emulgačného prostriedku ubúda účinnosť chladiaceho účinku. Veľkosť mazacieho účinku je daná koncentráciou a vlastnosťami emulgačného prostriedku. Schopnosť ochrany proti koróziám závisí na hodnote pH emulzie ako takej. V rozmedzí pH 8–9 poskytuje dostatočnú ochranu proti koróziám zliatin železa. Emulzné kvapaliny predstavujú približne 80 % všetkých používaných procesných kvapalín výroby [3, 8].

Procesné vlastnosti emulzných kvapalín závisia od prípravy, ktorej postup musí byť dodržaný. Je preto potrebné použiť vhodne upravenú vodu, emulgačný prostriedok musí byť pridávaný pozvoľne za stáleho miešania a koncentrácia emulzie je volená podľa druhu operácie a množstva ochranných látok [3, 5].

Všeobecne je uznávaný fakt, že teplotný limit emulzií je daný teplotou varu vody. Potrebnú účinnosť môže emulzia dosahovať aj pri vyšších teplotách. Keď je emulzia umiestnená na horúci povrch, jej olejová zložka sa uvoľní, prenikne na povrch cez parný filter a tým sa prejaví mazací účinok. Pri značne vysokých teplotách môže byť parný filter príliš hrubý alebo neporušený a prenos maziva sa zastaví. Pri kritickej teplote, vyššej než 200 °C, po vytvorení parného filmu emulzia postupne zlyháva ako mazivo. Okrem obmedzeného teplotného rozsahu, vykazujú emulzie nízku skladovaciu schopnosť, môžu byť degradované oxidáciou oleja a bakteriálnou kontamináciou vody [9].

Zdanlivá viskozita emulzií s rastúcim šmykovým napätím klesá, aj keď ich viskozitný index je zvyčajne vysoký. Emulzie typu „olej-voda“ majú vysokú viskozitu, ktorá je niekoľkokrát vyššia ako v prípade základného oleja. Vykazujú zaujímavé správanie v koncentrovaných kontaktoch pôsobiacich v elasto-hydrodynamických mazaniach (EHL). Veľkosť kontaktu EHL je porovnateľná s veľkosťou kvapôčok, pretože objem tekutiny v kontakte je podobný priemernému objemu kvapôčok. To vedie k tvrdeniu, že vytvorené elasto-hydrodynamické filmy boli pri použití emulzie nestabilné alebo kolísali. Toto však nie je experimentálne potvrdené a v skutočnosti je známe, že emulzia s nízkou stabilitou poskytuje najlepšie mazanie [9].

2.2.1 Problémy emulzných chladiacich kvapalín

Prostredie, s ktorým sa dostáva chladiaci kvapalina do kontaktu, značne ovplyvňuje jej vlastnosti i životnosť. V tabuľke 1 sú uvedené najčastejšie príčiny prehrievania emulzie, zvýšenia penivosti, straty protikorozy, stability, zanášania brusných kotúčov, znečistenia obrábacieho stroja, vzniku zápachu, kožných problémov obsluhy a ďalšie. V procese je teda nevyhnutné zabezpečiť a pravidelne vykonávať kontroly chladiacich kvapalín, pretože pravidelná kontrola a následný včasný zásah môže výrazne zredukovať vplyv nepriaznivých zaťažení alebo ich úplne eliminovať. To sa potom prejaví v:

- znížení nežiaducich prestojov obrábacieho centra – celej technologickej linky z dôvodu výmeny kvapaliny,
- výraznom znížení rizika vplyvu korózie na obrábaných materiáloch,
- znížení rizika vzniku kožnej dráždivosti obsluhy obrábacích centier,
- priamom znížení nákladov z dôvodu predčasnej výmeny chladiacej kvapaliny,
- zvýšení produktivity bez zvyšovania počtu zamestnancov, resp. počtu obrábacích strojov [10].

V tabuľke 1 sú uvedené najčastejšie príčiny zvýšenia penivosti, straty protikorózných vlastností, stability, vzniku zápachu, kožných problémov obsluhy a ďalšie.

Tabuľka 1 Nežiadúci stav kvapaliny zapríčinený negatívnymi vplyvmi a účinkami [10]

Skutkový stav chladiacej kvapaliny	Negatívne vplyvy a účinky
Nedostačujúce množstvo chladiacej kvapaliny, nepostačujúca nádrž obrábacieho stroja	Prehrievanie emulzie, nárast znečistenia a baktérií, zvýšená penivosť
Teplota chladiacej kvapaliny nad 30 °C	Zvýšený nárast baktérií, zvýšené opotrebovanie nástroja, tvorba dymu, zvýšená penivosť
Nízka koncentrácia chladiacej kvapaliny	Strata stability a protikorózných vlastností, opotrebenie nástroja, nárast baktérií, zníženie životnosti
Vysoká koncentrácia chladiacej kvapaliny	Zvýšené znečistenia obrábacieho stroja, zníženie chladiacich vlastností kvapalín, zanesenie brúsnych kotúčov, zvýšené riziko kožnej dráždivosti
Neprijemný zápach chladiacej kvapaliny	Skysnutie chladiacej kvapaliny, výrazná redukcia životnosti, výskyt korózie
Znečistenie chladiacej kvapaliny olejom alebo šponami	Redukcia životnosti kvapaliny, tvorba dymu, znečistenie stroja, kožná dráždivosť
Chladiaca kvapalina je znečistená biologickými nečistotami (cigarety, potraviny, obaly od nápojov)	Nárast tvorby baktérií, plesní a húb, kožné problémy, výrazná redukcia životnosti
Nárast baktérií	Kožné problémy, redukcia životnosti kvapaliny
Vysoké pH (> 9,3) chladiacej kvapaliny	Kožná dráždivosť
Nízke pH (< 8,0)	Zníženie stability a životnosti kvapaliny, nárast baktérií, problémy s protikoróznou ochranou
Vznik kontaktnej korózie	Korózia obrobkov a obrábacieho stroja
Vysoká tvorba peny chladiacej kvapaliny	Znečistenie obrábacieho stroja, zníženie chladiacich a mazacích vlastností, zníženie filtračnej schopnosti

2.2.2 Kontrola chladiacej kvapaliny

Dôležitým predpokladom pre stabilitu a bezpečnosť obrábacieho procesu, ako aj pre ochranu pracovníkov je pravidelná kontrola procesných kvapalín v prevádzke. Mnohé z týchto kontrolných meraní sú súčasťou tzv. celkového manažmentu kvapalín (angl. Total fluid Managment). Určité merania a kontrolu je potrebné vykonávať denne, nakoľko počas prevádzkového používania dochádza ku starnutiu procesných médií vplyvom ich oxidácie,

tepelného a mechanického namáhania, znečisťovaním a katalytickým účinkom kovov. Pre posúdenie stavu chladiacich médií sa sledujú rôzne fyzikálne a chemické ukazovatele, predovšetkým:

- hodnota pH,
- koncentrácia,
- množstvo baktérií,
- obsah nitridov a nitrátov,
- obsah cudzích olejov,
- viskozita,
- bod vzplanutia,
- obsah vody,
- obsah nečistôt,
- alkalita,
- obsah chloridov a síranov,
- vodivosť,
- odolnosť voči starnutiu a korozívnosť [10].

Prevádzková kontrola je obmedzená na posúdenie vzhľadu, pachu a vzhľadu povrchu oplachovaného obrobku kúsky chladiacou kvapalinou. Súvislý olejový povlak na povrchu emulzie upozorňuje na nestabilitu emulzie. Kaly na dne a stenách nádrže sú známami zosťarnutej a znečistenej kvapaliny [11, 12]

Kritickým stavom, ktorý by sa vo výrobe nemal dosiahnuť sú korózne škvrny na plochách výrobku a nástroja. Kontrola sa uskutočňuje lakmusovými papierikmi. Optimálna hodnota pH chladiacej kvapaliny je v rozmedzí 9,0–9,4. V prípade poklesu pH na hodnotu 8,8 dochádza ku korózii obrobku. Chladiace kvapaliny novej generácie majú svoje optimum v rozsahu 7,5–8,5 bez vplyvu korózie na obrobok [11, 13].

Nemalé problémy spôsobujú kvapaliny kontaminované baktériami zo vzduchu, zvyškov potravín alebo cigariet. Tomu je možné zabrániť baktericídnymi prísadami, ktoré nemusia mať priaznivý vplyv na stabilitu emulzie. Najúčinnším postupom je čistenie emulzie, dezinfekcia nádrže, prevzdušňovanie emulzie alebo jej sterilizácia nad 70 °C. Rozmnožovaniu baktérií možno zabrániť zvýšením alkality na hodnotu pH v rozmedzí 9,0 až 9,5 [11].

Chladiaci a mazací účinok chladiacich kvapalín je daný ich koncentráciou, ktorá sa vyjadruje hmotnostným pomerom koncentráty chladiacej kvapaliny k technickej vode. V prevádzke sa pri vodou riediteľnej chladiacej kvapaline spravidla meria uhol stočenej roviny polarizovaného svetla refraktometrom. Pre presné určenie koncentrácie je potrebná definícia koeficientu refraktometra. Výsledný súčin hodnôt uhla stočenej roviny a koeficientu predstavuje výslednú koncentráciu. Tento koeficient musí byť uvedený v technickom liste každej vodou riediteľnej chladiacej kvapaliny [13]. V liste sa taktiež udáva hodnota doporučenej tvrdosti vody, ktorá veľmi výrazne ovplyvňuje kvalitu chladiacich kvapalín.

Tabuľka 2 uvádza spôsoby kontroly a posúdenia kvality emulzie v priebehu jej používania vo výrobnom procese.

Tabuľka 2 Diagnostika kvapalín na základe spôsobu kontroly [12]

Spôsob kontroly	
Žiadna kontrola	Emulzia je používaná pokiaľ sa neobjavia problémy kvality obrobkov, so zdravotnými problémami obsluhy a poškodením stroja
Jednoduchá kontrola	Prevádzaná bez monitorovacích zariadení, posúdenie vzhľadu, pachu kvapaliny a vzhľadu povrchu oplachovaného chladiacou kvapalinou
Operatívna kontrola	Laboratórna Manuálna prevádzková s monitorovacími zariadeniami (ručný optický refraktometer, pH papieriky, papieriky na stanovenie tvrdosti vody a dusitanov)
Kontrola v reálnom čase (Real-time)	Monitorovacie systémy bez spätnej väzby (manuálna úprava) Monitorovacie systémy so spätnou väzbou (automatizovaná úprava)

Tvrdosť vody je daná obsahom vápenatých a horečnatých solí. Preto je potrebné vodu upravovať chemickými prísadami, ktorými sú kondicionéry na úpravu pH, protibakteriálne a protikorózne aditíva. Nemá priamy vplyv na technické parametre kvapalín, ale môže ovplyvniť životnosť a so stúpajúcou hodnotou tvrdosti chemickú stabilitu. Soli sa počas procesu začnú z homogenizovanej kvapaliny oddeľovať a na pevnom povrchu vytvárajú ťažko odstrániteľné nerozpustné usadeniny na chladiacej sústave, strojoch a filtroch. Neupravená voda tak spôsobuje koróziu. Tvrdosť vody zároveň vplýva na penivosť, ktorá spôsobuje problémy vytekania z nádrží, ako aj zavzdušňovanie tlakových čerpadiel chladiacich systémov. Základnou operáciou úpravy vody je zmäkčovanie. Určuje sa v stupňoch tvrdosti a rozoznávame 6 stupňov tvrdosti (tabuľka 3). Jej meranie sa vykonáva papierovými prúžkami podobne ako hodnota pH [3, 13].

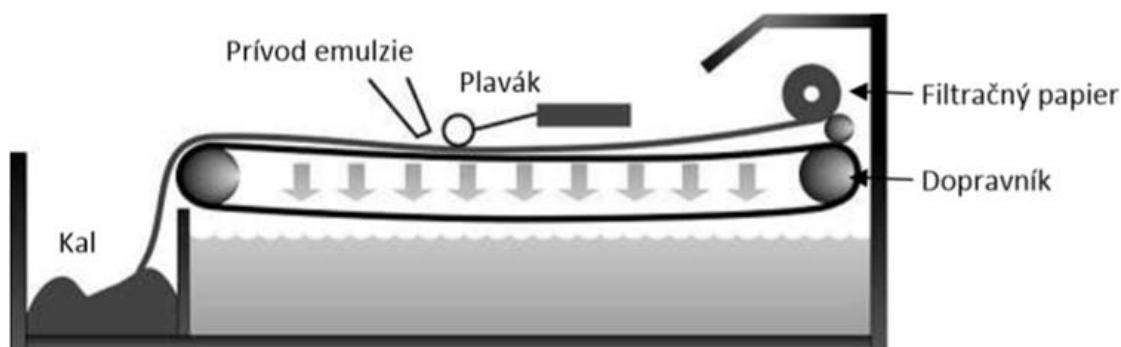
Tabuľka 3 Druhy vody podľa tvrdosti[3]

Druh vody	Tvrdosť [mmol]
Veľmi mäkká	0,000–0,716
Mäkká	0,716–1,432
Stredne tvrdá	1,432–2,148
Dostatočne tvrdá	2,148–3,222
Tvrdá	3,222–5,370
Veľmi tvrdá	nad 5,370

2.2.3 Recyklácia a opätovné použitie chladiacich kvapalín

V dôsledku odparovania, rozprašovania a odvodom na trieskach dochádza počas výrobného procesu k úbytku chladiacej kvapaliny. Tento úbytok predstavuje približne za jeden pracovný cyklus 5–7 % u emulzií, kedy výmena je vykonávaná približne po 8 týždňoch v závislosti od typu pracovnej prevádzky. Pri centrálnom rozvode, kedy je uskutočňované dokonalejšie čistenie, je doba výmeny dvojnásobná [12].

Nečistoty prítomné v reznej kvapaline negatívne ovplyvňujú výslednú drsnosť obrobenej plochy a majú vplyv na trvanlivosť nástroja. Odstrániť ich možno dokonalou filtráciou a čistením procesnej kvapaliny. Využíva sa proces usadzovania reznej kvapaliny v nádrži po jej odvode z miesta rezu. Pre dokonalé usadenie reznej kvapaliny sa využívajú magnetické filtre rotačného a prietokového typu, odstraňujúce kovové nečistoty. Tieto filtre však nezaručujú vyčistenie reznej kvapaliny od uvoľnených zŕn brúsneho materiálu a preto sú často spájané s mechanickými filtermi (obr. 4). Pri povrchových mechanických filteroch sa nečistoty zachytávajú na povrchu filtračného materiálu, ktorým je filtračný papier, plátno alebo sieťka (obr. 4). Filtračný papier zachytáva nečistoty väčšie ako 1 μm . Účinnejšie sú plátna vyrábané z umelých vlákien [12]. Snímok mechanického filteru z prevádzky je zobrazený na obr. 5.



Obr. 4 Schéma rezu povrchovo mechanického filtera (Sack) [12]



Obr. 5 Povrchovo mechanický filter (Sack) v pracovnom procese

V prípade, ak kvapalina vykazuje niektorý z uvedených parametrov, nemôže byť recyklovaná, je potrebné ju vymeniť:

- pH je menšie než 8,0 (optimálne rozhranie pH 8,5–9,4),
- koncentrácia kvapaliny je menej ako 2 % (optimálne rozmedzie 3–12 %),
- farba je tmavo šedá až čierna (optimálna je mliečno biela),
- silno skazený až kyslý zápach (optimálne jemne olejový) [12].

Ak kvapalina nespĺňa požiadavky v dôsledku premnoženia baktérií alebo iných technologických príčin a dôjde k jej degradácii, je potrebné kvapalinu zo systému odstrániť a zabezpečiť nové nasadenie procesnej kvapaliny. Použité emulzie sa nesmú bez predchádzajúcej úpravy vypúšťať do kanalizácie, ani do povrchových vôd i napriek tvrdeniam dodávateľov o biologicky odbúrateľných emulziách. Najvyužívanejšie postupy likvidácie s vodou miešateľných rezných kvapalín sú štiepenie, ultrafiltrácia a destilácia.

- *Štiepenie* (rozrážanie) emulzií je chemický proces, pri ktorom je atakovaný emulgátor, ktorý sa premení na neúčinnú látku a emulzia sa rozdelí na olejovú a vodnú zložku. Olejová zložka sa likviduje separátne ako priemyselný olej, vodná fáza sa dočisťuje ultrafiltráciou.
- Pri *ultrafiltrácii* prechádza cez polopriepustnú membránu (systém membrán) čisté rozpúšťadlo (voda) a malé molekuly, čím dochádza k zakoncentrovaniu olejovej zložky. Po tomto procese môže byť voda vypustená do kanalizácie. Ultrafiltráciou sa môže dočisťovať vodná fáza po štiepení emulzií alebo priamo likvidovať opotrebovaná emulzia.
- Destilácia je energeticky náročný proces likvidácie emulzií, využívajúci takmer výlučne vákuové filmové odparky, kedy sa voda odparuje za zníženého tlaku z tenkej vrstvy. Tento spôsob likvidácie je vhodný pre všetky typy s vodou miešateľných kvapalín [12].

2.3 Reológia

Vedný obor reológia sa zaoberá štúdiom vnútorných reakcií látok na pôsobenie vonkajších síl – deformovateľnosťou a tokovými vlastnosťami. Nejedná sa len o popis správania látok kvapalných, ale i látok pevných, nakoľko za určitých podmienok podliehajú toku. Pre potreby chemického inžinierstva má význam najmä fenomenologická reológia kvapalín, ktorá ich pokladá za kontinuum a formuluje zákonitosti viskózneho toku. Tok je špeciálny druh deformácie, pri ktorom sa častice materiálu pohybujú k sebe alebo od seba [14,15].

Reologické správanie tekutých materiálov má dôležitú úlohu v rade technologických operácií. Tokové vlastnosti kvapalín sú vyjadrené reologickými stavovými rovnicami, ktoré spravidla vyjadrujú vzťah medzi deformačným šmykovým napätím a deformáciou kvapaliny. Grafickým vyjadrením týchto rovníc sú tokové krivky. Podľa správania sa kvapaliny rozdeľujú na Newtonovské a ne-Newtonovské [14,16, 17].

Medzi základné reologické merania patria testy tokové, oscilačné a prechodové. Vždy sa meria odpor voči toku, čo je viskozita definovaná ako nedostatok klzkosti či vnútorné trenie.

2.3.1 Viskozita

Viskozita, ktorá charakterizuje vnútorné trenie kvapalín, ktoré je spôsobené predovšetkým príťažlivými silami medzi časticami v nej, je základnou vlastnosťou kvapalín. Kvapaliny s väčšou príťažlivou silou majú väčšiu viskozitu (väčšie brzdenie pohybu kvapaliny alebo jej častíc). Ideálna kvapalina má nulovú viskozitu. Kvapaliny s nenulovou viskozitou sa označujú ako viskózne. Čím je jej hodnota nižšia, tým kvapalina lepšie tečie. Vyššia hodnota viskozity predstavuje väčšie brzdenie pohybu alebo častíc v kvapaline. Je teda hlavným faktorom pri určovaní síl, ktoré musí kvapalina prekonať pri toku. Viskozita je funkciou šmykovej rýchlosti alebo napätia, času a teploty [17].

Rozoznávame niekoľko typov viskozity:

- *Dynamická* viskozita nastáva pri pohybe dvoch rovnobežných dosiek pohybujúcich sa priamočiarym pohybom voči sebe. Dynamická viskozita je závislá na teplote. So stúpajúcou teplotou jej hodnota klesá. Je definovaná Newtonovou rovnicou (rovnica 1) [18,19].
- *Kinematická* viskozita je definovaná ako podiel dynamickej viskozity a hustoty meranej kvapaliny. Polymérne systémy s relatívne vysokou viskozitou sa svojimi tokovými vlastnosťami nepodriaďujú jednoduchému Newtonovmu zákonu a chovajú sa ako ne-Newtonovské kvapaliny. Je daná vzťahom:

$$v = \frac{\eta}{\rho}, \quad (3)$$

kde v je kinematická viskozita [$\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$], η dynamická viskozita [$\text{Pa} \cdot \text{s}$] a ρ hustota [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] [18, 20].

- *Zdanlivá* viskozita je veličinou vyskytujúcou sa len pri ne-Newtonových kvapalinách. Je premennou veličinou, nie však parametrom kvapaliny. Hodnota nadobúda podľa okamžitého napätia a nemožno ju použiť k fyzikálnemu hodnoteniu konzistencie ne-Newtonovských kvapalín. Je pomerom okamžitej hodnoty šmykového napätia a šmykovej rýchlosti [21].
- *Plastická* viskozita popisuje charakteristiku Binghamských tekutín. Jej hodnota je konštantná. Platí len pre tekutiny, ktorých šmykové napätie je za medzou toku [22].

Pre meranie viskozity sa používajú viskozimetre a reometre. U Newtonovských kvapalín je často postačujúce iba meranie viskozity za danej teploty a to na niektorom z bežne užívaných typov viskozimetrov (telesové, kapilárne, vibračné a rotačné), pretože viskozita sa mení len s teplotou a tlakom. Pre charakterizáciu viskozity ne-Newtonovských kvapalín, ktorá nie je látkovým parametrom, je však vhodné použiť reometer, pretože podávajú informáciu o zmene tokových vlastností v čase i so zmenou šmykového napätia. Výsledkom merania je toková

krivka. Orientačné meranie viskozity ne-Newtonovských kvapalín sú vhodné viskozimetre rotačné a kapilárne [14,18, 21].

2.3.2 Newtonovské kvapaliny

Viskozita Newtonovské kvapaliny sa nemení s rýchlosťou alebo časom deformácie (s teplotou a tlakom k zmenám dochádza). Takýto typ kvapaliny je idealizáciou, ale v mnohých prípadoch ide o veľmi dobré znázornenie tokového správania mnohých kvapalín. Pomenované boli po fyzikovi Issacovi Newtonovi (1642–1726), ktorý popísal tok kvapalín jednoduchým lineárnym vzťahom medzi šmykovým napätím a rýchlosťou šmykovej deformácie. Táto rovnica charakterizuje tvarové zmeny v tečúcej kvapaline (Newtonov zákon viskozity):

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} = \eta \cdot \frac{du}{dx}, \quad (1)$$

kde τ je šmykové napätie [Pa], η dynamická viskozita [Pa·s] $\dot{\gamma}$ gradient rýchlosti deformácie [s^{-1}] [14,16,17].

Dynamická viskozita je u tohto typu kvapalín závislá len na teplote a tlaku a nárast šmykového napätia voči gradientu rýchlosti deformácie je lineárny; viskozita udáva sklon krivky. Zmena viskozity s tlakom, v prípade jeho zmeny o 1 bar oproti atmosférickému tlaku, je veľmi malá, významná je však zmena s teplotou. V najjednoduchšom prípade sa teplotná zmena viskozity popisuje Arrheniovou rovnicou (2):

$$\eta = A e^{\frac{E_a}{RT}}, \quad (2)$$

kde A je predexponenciálny faktor [mPa·s], E je aktivačná energia, R je univerzálna plynová konštanta a T je termodynamická teplota.

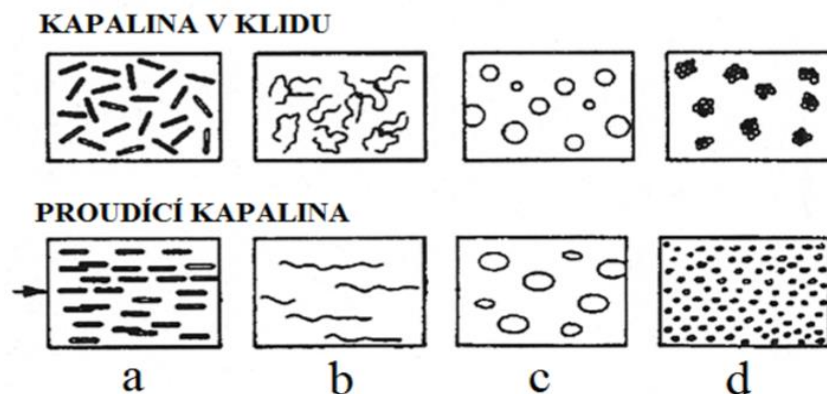
Medzi Newtonovské kvapaliny zaradujeme vodu a organické rozpúšťadlá [14, 16, 17].

2.3.3 Ne-Newtonovské kvapaliny

Kvapaliny, ktoré sa neriadia Newtonovým zákonom, sa označujú ako ne-Newtonovské; ich reologické správanie je zložitejšie. Patria sem roztoky a taveniny polymérov, suspenzie, rôzne pasty apod. Platí pre ne vzťah analogický s Newtonovým zákonom:

$$\tau = \eta D, \quad (3)$$

kde η je zdanlivá viskozita závisiaca na deformácií alebo dotyčnicovom napätí a D je Deborino číslo. Toto vyjadruje pomer charakteristického času relaxácie materiálu ku charakteristickému času zrejmej deformácie materiálu. Vysoké D svedčí o tom, že látka sa bude správať ako pevný materiál, zatiaľ čo nízka hodnota D vypovedá o kvapalnom správaní. Príčinou ne-Newtonovského správania kvapalín je špecifická interakcia častíc v závislosti na pôsobiacom napätí (pod vplyvom toku). Častice sa môžu orientovať, rozpletať, deformovať, usporadúvať, môže dôjsť ku rozbitiu agregátov a aj ku vzniku novej štruktúry (obr. 6) [16].



Obr. 6 Náčrt stavu častíc pod vplyvom toku v ne-Newtonovskej kvapaline a) orientácia, b) napätie, c) deformácia, d) rozomletie [16]

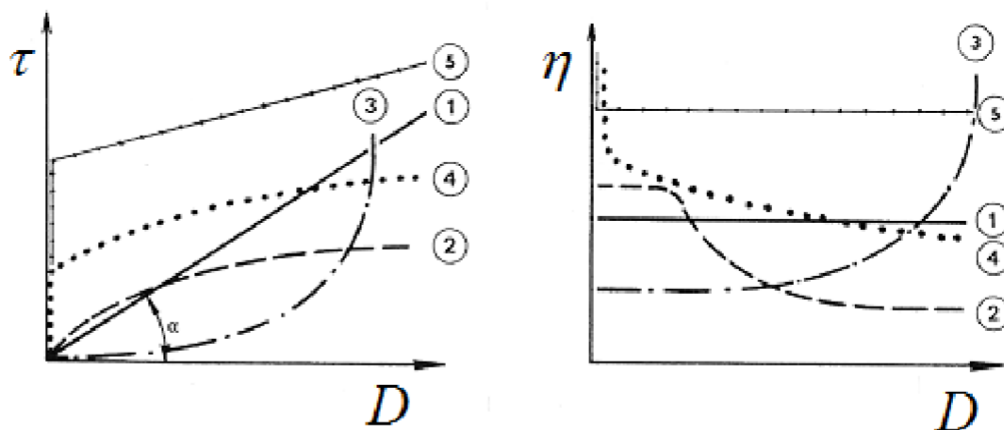
Všetky kvapaliny možno rozdeliť do troch skupín na:

- časovo závislé,
- časovo nezávislé
- visko-elasticky závislé.

V reálnom svete ale dochádza v niektorých kvapalinách k prekryvu tohto rozdelenia a hovoríme tak o kvapalinách komplexných. Do skupiny časovo nezávislých patria také, ktorých sa **viskozita alebo šmykové napätie mení s nárastom šmykovej deformácie**. Hovoríme o zobených Newtonovských kapalinách, ktorými sú Binghamské tekutiny, pseudoplastické tekutiny a dilatantné tekutiny. Pokiaľ pri náraste deformácie dochádza k nárastu viskozity, hovoríme o **šmykovom spevnení** kvapaliny, pokiaľ dochádza ku zníženiu viskozity, hovoríme o **šmykovom zriedení** kvapaliny [14].

- *Binghamské tekutiny* sú kvapaliny s plastickou zložkou deformácie, pri ktorých dochádza k toku až po prekročení určitého prahového šmykového napätia, resp. medze toku (obr. 7). Po znížení napätia sa v látke obnoví pôvodná štruktúra. Toto správanie je typické pre koncentrované kašovité a zrnité suspenzie, priemyselné a odpadné kaly, riedke kaše, pasty, plastické gély, olejové farby apod. [16, 21].
- U *Pseudoplastických tekutin* sa zdanlivá viskozita znižuje s rastúcim gradientom rýchlosti. Na základe priebehu tokových kriviek sa môžu rozlišovať dve podskupiny: pravé pseudoplastické kvapaliny a štruktúrne viskozitné kvapaliny, pri ktorých možno stanoviť dve limitné hodnoty zdanlivej viskozity. Pri zvyšovaní rýchlostného gradientu je možné pozorovať deformáciu, rozpleťanie a orientáciu nesúmerných častíc a molekúl. Tieto častice sa náhodne premiešavajú. Pri uvedení do pohybu dochádza k ich narovnaniu v smere osy do smeru pohybu. Tečú už pri nízkom napätí. Znižujú tak energetickú náročnosť pri výrobných procesoch miešania a pri prúde kvapaliny, čo je priaznivá vlastnosť z technologického hľadiska [16, 21].
- *Dilatantné tekutiny* sú látky, pri ktorých zdanlivá viskozita rastie s rastúcim gradientom rýchlosti. Toto správanie je pomerne menej časté a bolo spozorované pri niektorých vysoko koncentrovaných suspenziách. Pri malých napätiach tieto látky pripomínajú kvapalinu Newtonskú a zdanlivá viskozita je konštantná. Pri väčších

napätiach dochádza k nárastu zdanlivej viskozity, čo je nepriaznivým technologickým javom. Príkladom tekutín tohto typu chovania sú tlačiarenské farby, rozpúšťadlá farieb, arabská guma, med apod. [16, 21].

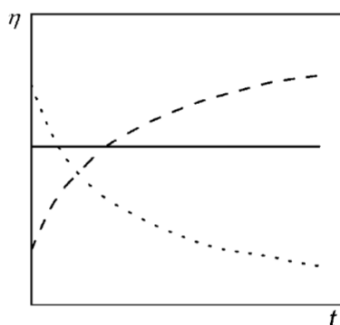


Obr. 7 Tokové a viskozitné charakteristiky ne-Newtonovských kvapalín: 2) štruktúrne viskózna, 3) dilatantná, 4) plastická, 5) Binghamská a 1) Newtonovská kvapalina [20]

Kvapaliny, pri ktorých sa viskozita alebo šmyková deformácia mení v čase pri pôsobení konšt. šmykovej deformácii, sa nazývajú tixotropné a reopektické tekutiny.

- Pri *tixotropných tekutinách* zdanlivá viskozita týchto kvapalín klesá s predlžujúcou sa dobou pôsobenia napätia a dochádza k ich rednutiu. V kludovom stave sa obnovuje pôvodná štruktúra a viskozita sa blíži počiatočnej hodnote (obr. 8). Tixotropné správanie vykazujú látky plastické a pseudoplastické. V technológií sa toto správanie využíva pre stanovenie spúšťacieho príkonu miešadiel [16, 18].
- Zdanlivá viskozita *reopektických tekutín* behom šmykového namáhania s časom rastie. Tento typ chovania je zriedkavý. Do tejto skupiny patria veľmi koncentrované suspenzie a roztoky makromolekúl [20].

Viskoelastické tekutiny vykazujú po odňatí deformačného napätia čiastočný elastický návrat – do určitej miery si pamätajú svoj pôvodný tvar a po ukončení pôsobenia napätia prejavujú tendenciu vrátiť sa do pôvodného stavu. Jedná sa o kombináciu chovania ako viskóznej kvapaliny, tak aj elastickej pevnej látky – sú tekuté, ale podobajú sa plastickým pevným látkam [14].



Obr. 8 Časová závislosť viskozity: Newtonovská kvapalina (plná čiara), tixotropná kvapalina (bodkovaná čiara), reopektická kvapalina (prerušovaná čiara) [18]

2.4 Meranie tokových vlastností

Pre meranie toku kvapalín je potrebné definovať veličiny podieľajúce sa na toku a správne zvoliť vhodné podmienky pre definovanie tokových vlastností. Získané údaje sú vyhodnotené do tokových kriviek, ktoré sú závislosťou šmykového napätia na gradiente rýchlosti deformácie. Na základe týchto kriviek je vyhodnotený správny vzorok, ktorej je priradený príslušný model správania. K získaniu informácií o toku kvapaliny.

Rotačné reometre predstavujú sofistikovanú skupinu prístrojov určených k charakterizácii reologického chovania širokého spektra materiálov. Možno merať v ustálenom šmykovom poli (šmykové napätie, rýchlosť šmykovej deformácie, prahové napätie) aj v oscilačnom poli (viskoelastické moduly, komplexná viskozita). Hlavnú pracovnú časť rotačného reometru tvoria dve časti geometrie majúce spoločnú os – pohyblivá (rotor) a statická (stator), medzi ktoré je umiestnený skúšaný materiál. Vzorka je tak podrobená šmyku medzi dvoma plochami, z ktorých jedna vykonáva rotačný pohyb a vyhodnocuje sa brzdný účinok vzorky pri rôznych rýchlostiach otáčania. Existujú dva pracovné režimy, v ktorých reometre pracujú. V prvom prípade je nastavené šmykové napätie a úmerne tomu sa meria šmyková deformácia (CS, Controlled Stress), druhým spôsobom merania je opačný, k nastavenej šmykovej deformácii sa meria šmykové napätie (CR, Controlled Rate) [16, 18, 20, 23].

Pre kvapalné vzorky alebo taveniny sú najčastejšie testy tokové, oscilačné a prechodové.

- **Oscilačné testy** sa prevádzajú v lineárnej visko-elastickej oblasti buď pri konštantnom šmykovom napätí a rozsahu frekvencií alebo pri jednej hodnote frekvencie cez rozsah šmykových napätí. Lineárna oblasť sa určuje pri frekvenciách 1 Hz v rozsahu deformácie, ktorou umožňuje reometer. Z tejto oblasti sa vyberie hodnota deformácie, v ktorej je závislosť elastického modulu na šmykovej deformácii lineárna a pri nej sa prevedie teplotné alebo časové meranie [14].
- **Šmykové (tokové) testy** sa vykonávajú v závislosti na rýchlosti šmykovej deformácie pri jednej teplote alebo pri jednej hodnote šmykovej deformácie v závislosti na teplote. Nárast šmykovej deformácie môže byť buď krokový, alebo kontinuálny a je možné merať taktiež v móde ustáleného šmykového toku. Významné a často

opomínané je meranie pri konštantnom šmykovom napätí alebo deformácií v čase pre určenie stability kvapaliny [14].

- **Prechodové testy** sa vykonávajú pre štúdium návratu po krípe alebo relaxácie napätia. Tieto testy sa v oblasti kvapalín často merajú v potravinárstve [14].

2.4.1 Geometrie pre meranie tokových vlastností

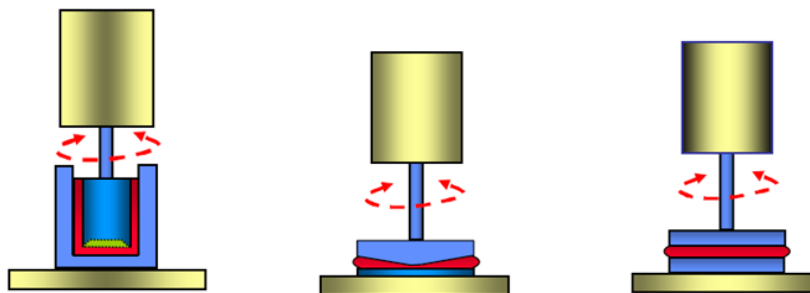
Pre meranie reometrom možno použiť tri základné typy geometrie: valec-valec, kužeľ-doska a doska-doska.

- **Geometria valec-valec** pozostáva z vnútorného valca predstavujúceho meracie teleso a z vonkajšieho valca slúžiaceho ako odmerka kvapaliny (obr. 9a). Používa sa pre merania nízko-viskózných kvapalín. Vplyvom otáčania je vzorka pod vplyvom šmyku medzi dvoma plochami geometrie a vyhodnocuje sa brzdný účinok kvapaliny pri rôznych rýchlostiach otáčania valca. Určité problémy spôsobuje ten fakt, že v rôznych bodoch meranej kvapaliny v odmerke je rôzna šmyková rýchlosť. Treba tiež počítať s ohrevom vzorky počas merania, ktorý sa s viskozitou a rýchlosťou otáčania zvyšuje [16, 20, 23].
- **Geometria kužeľ-doska** pozostáva z hornej kužeľovej pohyblivej časti a spodnej stabilnej (obr. 9b). Rozmery kónického povrchu sú dané polomerom kužeľa. Výhodou usporiadania geometrie je, že deformačná rýchlosť nie je závislá od vzdialenosti od stredu dosky. Malé množstvo vzorky (cca 1 ml), ktoré k analýze postačuje, sa vkladá do úzkej medzery medzi časťami. Toto usporiadanie je vhodné pre meranie tokových vlastností neplnených kvapalín alebo disperzií s veľkosťou častíc menšou ako je 1/10 vzdialenosti kužeľa a dosky o viskozite $> 10 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ [23,24]. Nevýhodou je teplotná závislosť veľkosti medzery, príprava vzoriek o vysokej viskozite a vznik nestability toku pri vysokých šmykových rýchlostiach (porušenie kvapaliny a jej strata vďaka odstredivej sile) [14].
- **Geometria doska-doska** pozostáva z dvoch rovných dosiek, kde horná sa otáča a spodná doska je pevná (obr. 9c). Geometria je určená polomerom dosky R , ktorý je 20–60 mm (20 mm pre látky s viskozitou karamelu a 60 mm pre látky s viskozitou mlieka). Geometria je vhodná aj pre plnené kvapaliny. Výhodou je hrúbka vzorky od 0,5 do 2,0 mm a ľahká príprava vzoriek o vysokej viskozite. Šmykovú rýchlosť je možné meniť polomerom dosiek a hrúbkou vzorky. Geometria je veľmi vhodná pre teplotné meranie. Prípadný preklz vzorky po povrchu je možné eliminovať zdrsneným povrchom. Geometria je špecifická pre meranie v lineárnej oblasti deformácie v oscilačnom móde. Nevýhoda geometrie spočíva v nekonštantnom gradiente rýchlosti deformácie po celej ploche dosky pri konštantnej rýchlosti otáčania, ktorý sa mení v závislosti od stredu dosky. Šmyková rýchlosť je tak v určitej závislosti na R [24].

Sústredné valce

Kúžeľ-doska

Doska-doska

Veľmi nízka až stredná η Veľmi nízka až vysoká η Veľmi nízka η až mäkké
pevné materiály

a)

b)

c)

Obr. 9: Geometria a) valec-valec, b) kužeľ-doska, c) doska-doska [25]

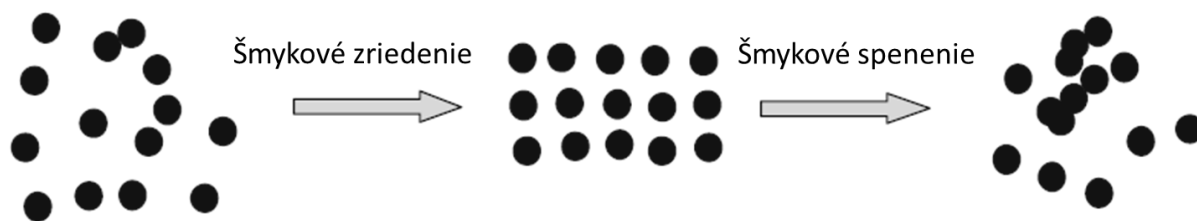
2.4.2 Reológia multifázových kvapalín

Multifázová kvapalina je taká, ktorá pozostáva z dispergovanej fázy (pevná látka, kvapalina, plyn) v kvapalnej matici; nazýva sa tiež štruktúrovaná alebo komplexná kvapalina. Medzi multifázové kvapaliny patria farby, nátery, atramenty, lepidlá, rezné kvapaliny, keramika, potraviny, liečivá, kozmetika, šampóny, sprchové gély, detergenty a stavebné materiály. V prípade, že dispergovanou fázou je pevná látka, jedná sa o disperziu, pokiaľ kvapalina, jedná sa o emulziu a pokiaľ plyn, jedná sa o penu. Dispergovaná fáza mení tokové pole a tým reologické vlastnosti kvapalnej matrice. Tie sú závislé na koncentrácií dispergovanej fázy a na veľkosti častíc [14].

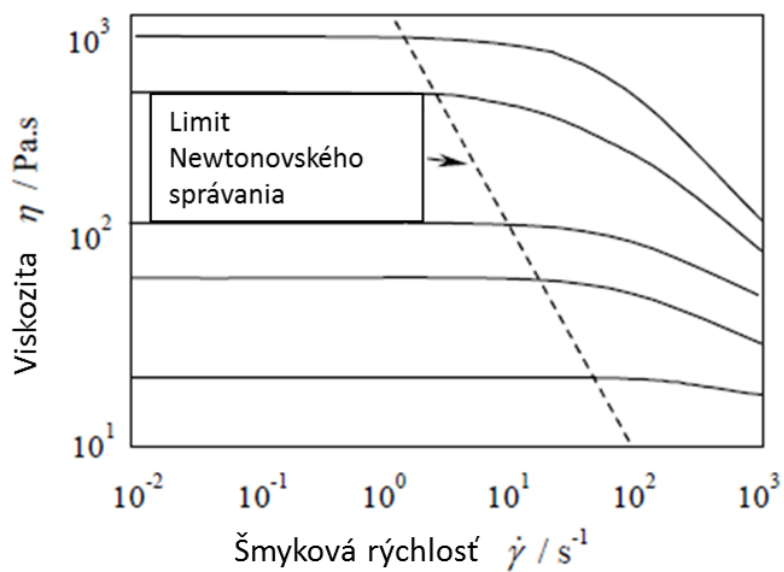
Šmykové pole orientuje častice v smere toku (obr. 10) a dochádza ku šmykovému zriedeniu (viskozita klesá; obr. 11–13), teda k vytvoreniu vnútornej štruktúry; vírivý (turbulentný) tok (vysoká šmyková rýchlosť alebo šmykové napätie) vedie k rozbitiu tejto štruktúry a k vzniku zhlukov častíc a hovoríme o šmykovom spevnení (viskozita rastie; obr. 12). V ustálenom stave sa štruktúrovaná kvapalina vracia do pôvodného stavu. Miera návratu do pôvodného stavu sa meria v čase po aplikácii určitého šmykového napätia. Napätie, pri ktorom dochádza k prudkému poklesu viskozity (obr. 13) sa nazýva medza klzu (medza klzu nemá fyzikálny význam z meraní mechanických vlastností [14]).

Obrázok 12 zobrazuje typické tokové krivky rôznych koncentrovaných kvapalín – viskozita rastie so zvyšujúcou sa koncentráciou a súčasne sa skracuje oblasť Newtonovského správania.

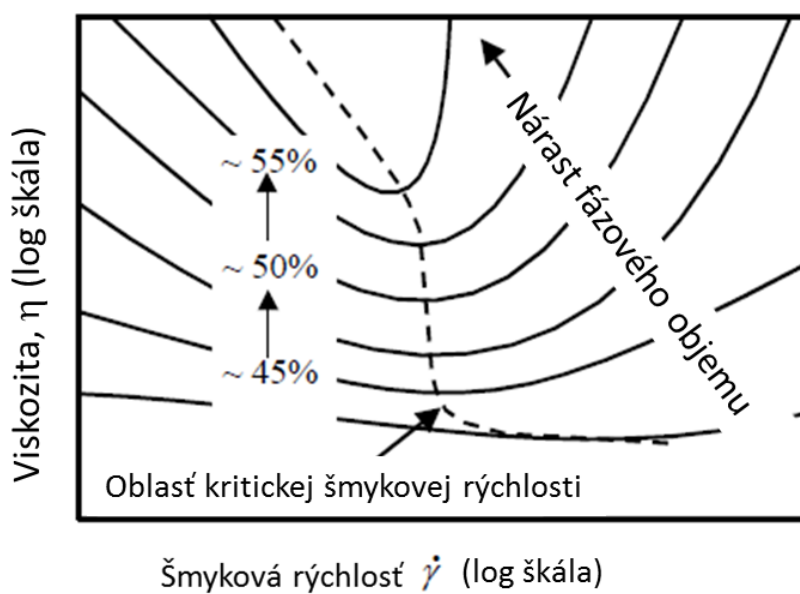
Vplyv tvaru a obsahu častíc na relatívnu viskozitu uvádza obr. 14. Z neho je zrejmé, že efekt šmykového spevnenia je pre rovnaký obsah častíc v tvare tyčiniek veľký (napr. vlákna) a najmenší pre guľové (sférické) častice.



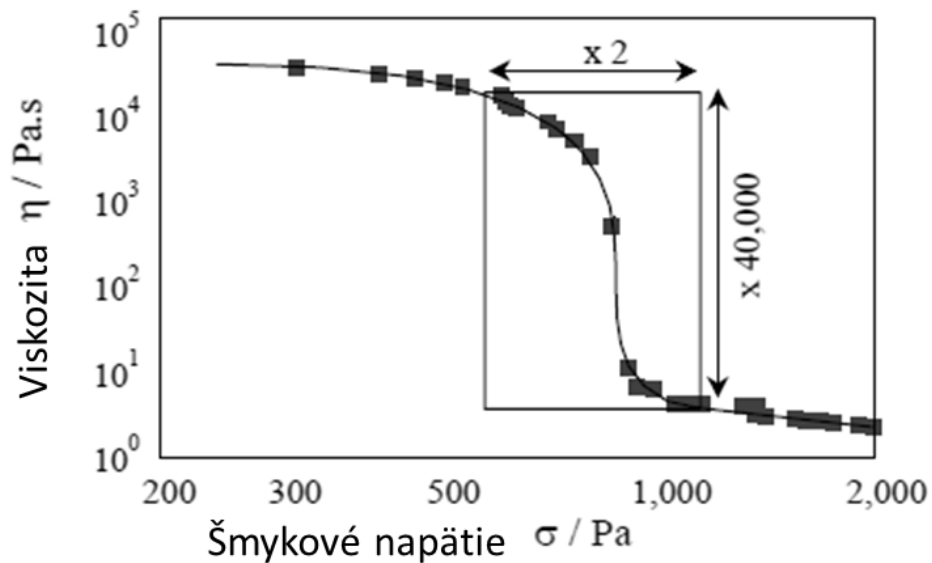
Obr. 10: Schéma šmykového zriedenia a šmykového spevnenia [14]



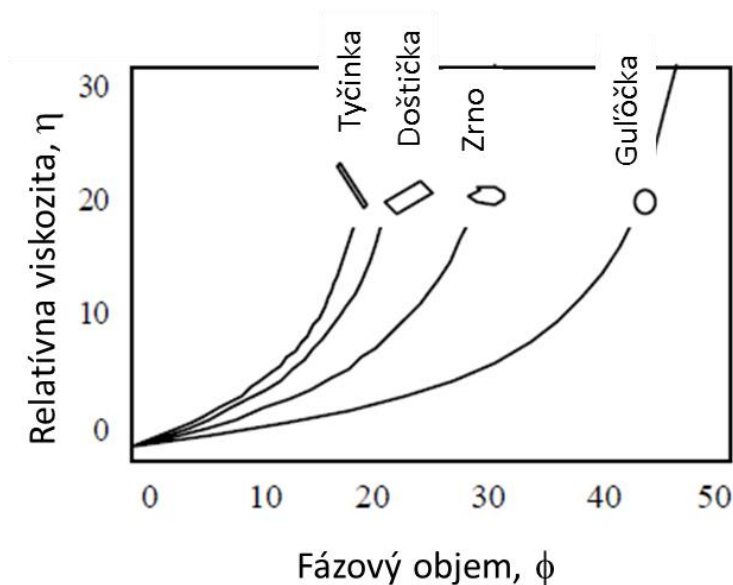
Obr. 11: Závislosť viskozity na šmykovej rýchlosti silikónových olejov [14]



Obr. 12: Schematické znázornenie tokových kriviek suspenzie vykazujúci šmykové spevnenie pre rôzne fázové objemy [14]

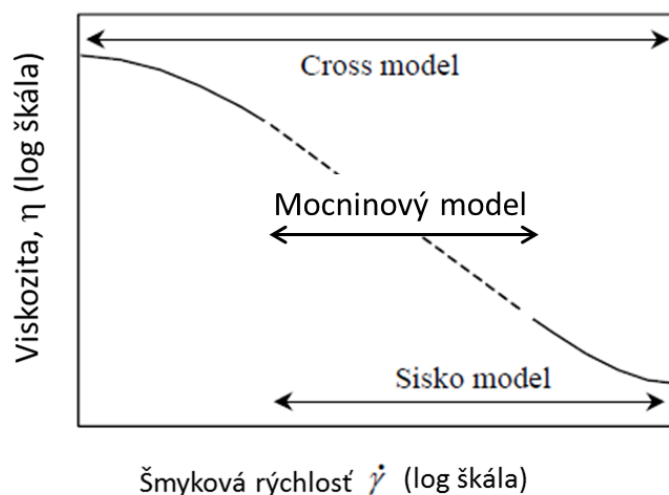


Obr. 13: Toková krivka koagulovaného atramentu [14]



Obr. 14: Relatívna viskozita ako funkcia tvaru a obsahu častíc [14]

Pri šmykovom zriedení sa na tokovej krivke pre široký rozsah šmykových rýchlostí objavujú dve Newtonovské oblasti spojené lineárnou oblasťou poklesu viskozity so smernicou -1 (obr. 15), vyhodnocujúca sa mocninovým modelom. Z Newtonovskej oblasti pri nízkej šmykovej rýchlosti sa z Crossovho modelu vyhodnocuje nulová šmyková viskozita (η_0) a z oblasti vysokej šmykovej rýchlosti sa zo Siskovho modelu vyhodnocuje nekonečne veľká šmyková viskozita (η_∞). Niekedy však nie je možné s ohľadom na mieriaci rozsah reometra, viskozitu, koncentráciu či tvar a veľkosť častíc získať celú závislosť. Časť krivky pri vysokých šmykových rýchlostiach nie je typicky merateľná pre polymérne taveniny či šampóny a tokové správanie pri nízkych šmykových rýchlostiach nie je často postihnutá pre disperzie a emulzie [14].



Obr. 15 Schematická závislosť viskozity na šmykovej rýchlosti a modely pre vyhodnotenie jednotlivých častí [14]

Medzi všetkými modelmi popisujúce správanie časovo nezávislých kvapalín sa častou využíva model Heschel-Bulkley [14]:

$$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma}^n, \quad (4)$$

kde τ je šmykové napätie [Pa], τ_0 je medzné napätie, η dynamická viskozita [Pa·s], $\dot{\gamma}$ gradient rýchlosti deformácie [s^{-1}] a n je index tokového správania.

Závislosť viskozity na zložení kvapaliny je veľmi špecifická a pre vyhodnotenie neexistujú žiadne všeobecné modely. Modely, ktoré sa navrhujú, sú vždy empirické, vzniknuté na základe merania tokových vlastností v závislosti na zmene zloženia danej kvapaliny [14].

2.5 Stanovenie obsahu nízkej koncentrácie olejov vo vode

Oleje sa z vody extrahujú roztokom freónov. V dnešnej dobe sa používa hexán a následne sa tento roztok meria termogravimetricky (odparí sa rozpúšťadlo a zvyšný olej sa zváži). Prebytočný olej sa meria pomocou FTIR a jeho obsah sa určuje na základe kalibračnej krivky. Ďalej sa pre analýzu oleja používa GPS pre extrakciu chladiacej kvapaliny v pentáne [26].

3. EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

3.1 Materiál

K analýze reometrom boli podrobené polysyntetické vodou riediteľné chladiace kvapaliny typov QAKERCOOL® 3601H (A), QAKERCOOL® 3520H (B) a ich zriedené kvapaliny z procesu (kvapalina A, kvapalina B). Interval odobratia bol raz za mesiac, v prípade čistenia kvapaliny a strojov bol odber prevádzaný hodinu pred čistením a deň po. Procesná kvapalina je používaná podľa kvality po dobu 3 až 4 mesiacoch, pričom behom procesu neustále cirkuluje cez mechanický filter, kde sa zachytávajú pevné nečistoty, predovšetkým špony uvoľnené pri obrábaní.

Novo pripravená procesná kvapalina bola vždy 4% roztokom chladiacej kvapaliny A a B. Tieto kvapaliny sú považované za referenčné a ďalej označené ako A-ref a B-ref. Kvapaliny odoberané po mesačnom intervale sú označené v poradí podľa doby užívania takto: A-M1 (koniec používania), A-F (odber po troch mesiacoch), A-A (odber po dvoch mesiacoch). Analogicky sú označené vzorky pre kvapalinu B.

QAKERCOOL® 3601H je vodou riediteľná polysyntetická kvapalina so stredne vysokým obsahom minerálnych olejov, vhodná na operácie obrábania a brúsenia väčšiny technických materiálov, najmä však ocele a liatiny. Ako chladiaci kvapalina sa v závislosti od druhu operácie používa v rozpätí koncentrácie 4–8 %. Tvrdosť vstupnej vody musí byť 270–400 ppm (27–40 °TH, 15–22 °DH) [27].

QAKERCOOL® 3520H je vodou riediteľná polysyntetická kvapalina so stredne vysokým obsahom minerálnych olejov, vhodná na obrábanie a brúsenie väčšiny technických materiálov, najmä však ocele a liatiny. Na rozdiel od chladiacej kvapaliny QAKERCOOL® 3601H sa v závislosti na druhu operácie používa v rozpätí koncentrácií 4–8 %. Tvrdosť vstupnej vody však musí byť vo väčšom rozpätí, a to 180–450 ppm (18–45 °TH, 10–25 °DH) [28].

Základné parametre použitých kvapalín uvedené v materiálovom liste výrobcu, ukazuje tabuľka 4.

Tabuľka 4 Základní parametre chladiacej kvapaliny A a B [27, 28]

Parametre	QAKERCOOL® 3601H (A)	QAKERCOOL® 3520H (B)
Vzhľad/sfarbenie	Priehľadný svetlo jantárový	Priehľadný svetlo jantárový
Viskozita [mm ² /s] (40°C)	57	51
Hustota [kg/ m ³]	1079	1058
Bod tuhnutia [kg/ m ³]	<0	<0
Vzhľad v zriedenom stave	Nepriehľadný	Priesvitný
pH v zriedenom stave	9,5	9,4
Alkalita (pH=5) [ml 0,1N/%/25 ml]	5,9	4,1
Korózna ochrana [% DIN 51360 T2]	3	4,5
Kyslé špiepenie (Acid split) [ml/%]	0,30	0,25
Refraktometrický faktor [%/°Brix]	1,5	2,0

3.1.1 Príprava vzoriek

Chladiace kvapaliny odobraté z prevádzky boli merané bez ďalšej úpravy.

Z koncentrátov chladiacich kvapalín boli s destilovanou vodou pripravené roztoky o koncentráciách 2, 4, 6 a 8 % (pre kvapalinu A je označenie A-2, A-4, A-6, A-8; analogicky boli označené roztoky pre chladiacu kvapalinu B). Je treba podotknúť, že označenie vzorky A-4 je totožné s označením A-ref, rovnako je tomu pre kvapalinu B. Označenie A-ref (B-ref) je použité pre zrovnanie kvapaliny z procesu, označenie A-4 (B-4) pre reologické meranie.

Pre určenie prítomnosti mikroorganizmov boli vzorky z procesu A-ref, A-M, A nariadené v pomere 1:10 a nanesené na kultivačné médium o objeme 5 ml. Kultivačné médium bolo pripravené nasledovne: do 150 ml destilovanej vody bolo navážených 6,5 g živného média a následne bola prevedená sterilizácia v autokláve pri 120 °C po dobu 15 min. Na kultivačné médium bola tiež nanesená destilovaná voda používaná pre prípravu procesných kvapalín.

3.2 Meranie

3.2.1 Morfológia emulzie pod optickým polarizačným mikroskopom

Vybrané emulzie kvapalín A boli po dôkladnom potrepaní nakvapkané na čisté podložné sklo a prikryté krycím sklíčkom. Morfológia emulzií bola pozorovaná za laboratórnej teploty pod optickým polarizačným mikroskopom BX50, Olympus.

3.2.2 Obsah vody, ďalších nízkomolekulárnych látok a nerozložiteľný podiel v emulziách

Termogravimetrické merania boli prevedené na prístroji Q500, TA Instrumenta v inertnej atmosfére dusíka (60 ml/min) v krokovom móde merania pri ohreve 20 °C/min z laboratórnej teploty do 800°C, úbytok hmotnosti pre začiatok izotermického kroku bol 4,20 % a úbytok hmotnosti pre ukončenie izotermického kroku nie väčší ako 0,42 %.

3.2.3 Stanovenie tokových vlastností emulzií

Tokové vlastnosti emulzií boli merané na reometre AR G2, TA Instruments s použitím geometrii valec-valec v rozsahu šmykových rýchlostí 1–100 rad/s. Roztoky emulzií pripravených z koncentrátov A a B boli merané pri teplote 25, 30, 35, 40, 45 a 50 °C, emulzie odobrané z prevádzky boli merané pri teplote 25 °C, pretože korešpondovala s teplotou haly výrobného procesu. Objem meranej kvapaliny bol vždy 19,6 ml. Geometria reometru bola pred každým meraním nakalibrovaná. Snímok reometru s geometriou valec-valec je na obr. 16.



Obr. 16 Reometer AR G2, TA Instruments

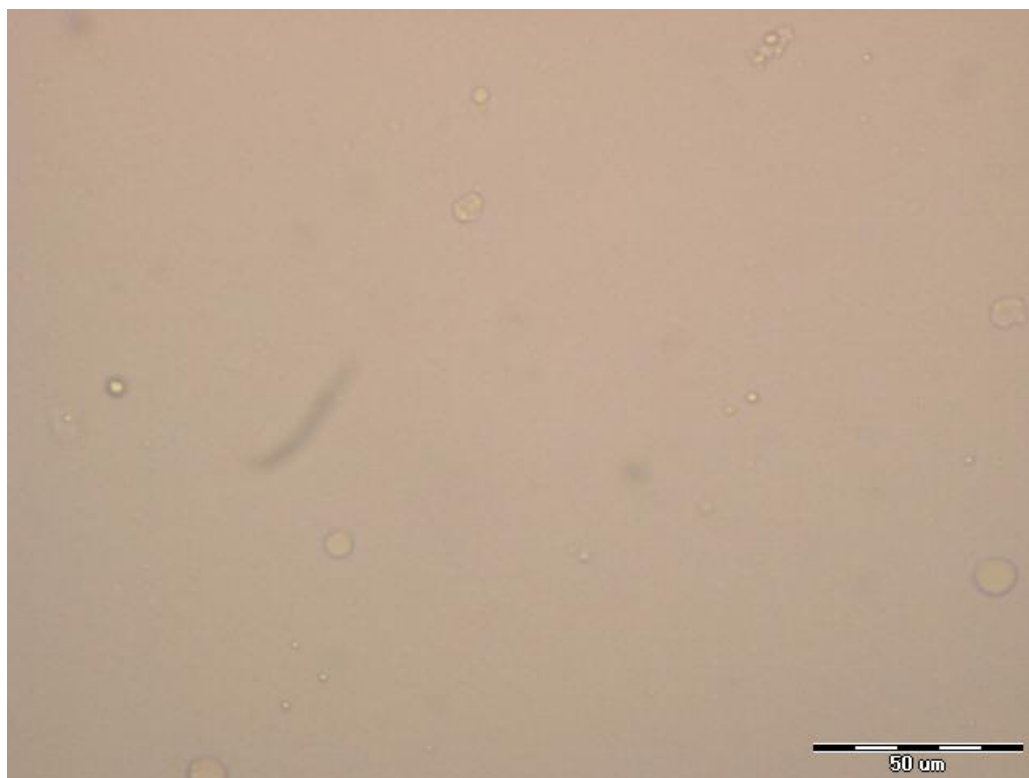
4. VÝSLEDKY A DISKUSIA

4.1 Morfológia emulzie pod optickým polarizačným mikroskopom

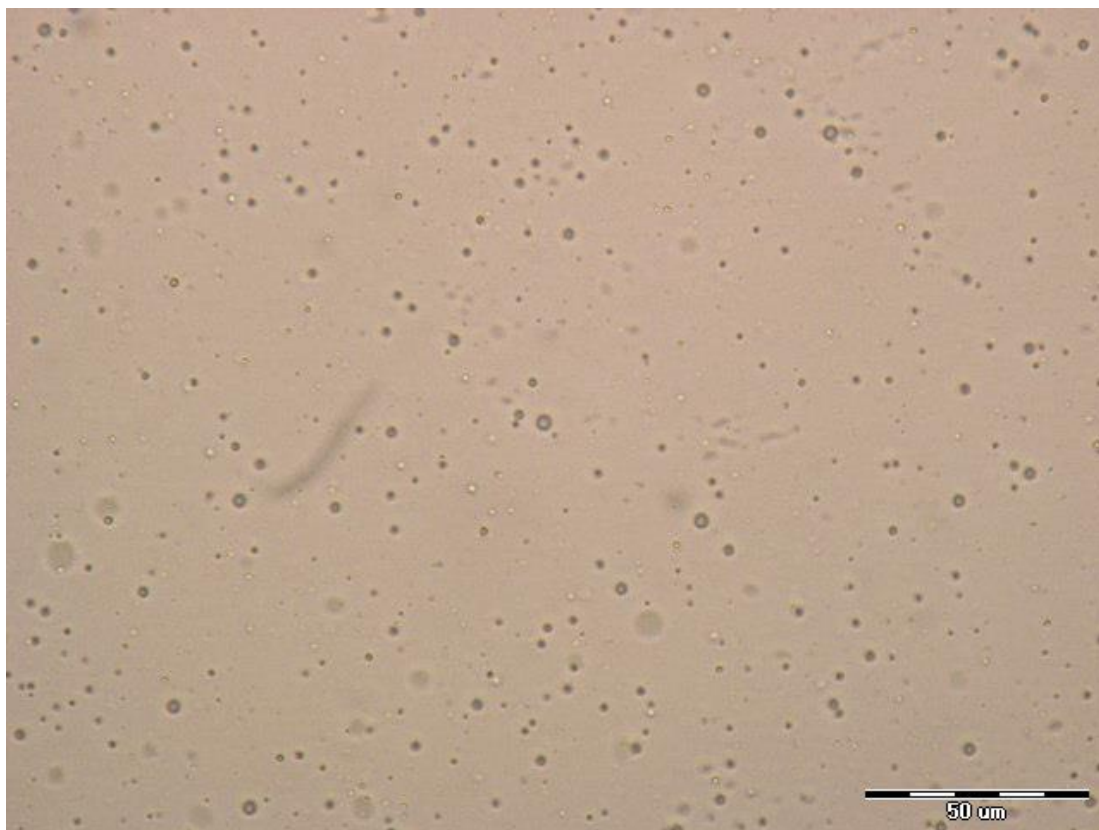
Morfológie kvapalín A sú uvedené na obrázkoch x-z. Na nich je zrejmé, že kontinuálna vodná fáza obsahovala rôzne množstvo guľových častíc, ktorých množstvo a veľkosť sa líšili. Tieto častice tvoria dispergovanú olejovú fázu pre vzorku A-ref (obr. 17), u kvapalín z procesu sú navyše prítomné i ďalšie nečistoty (obr. 18 a 19), ktoré mimo iného tvoria drobné častice kovu (špony). Zrovnanie počtu a veľkosti častíc je uvedené v tabuľke 5. Z meraní vyplýva rozdiel v miere znečistenia, kedy po 3 mesiacoch výrobného procesu došlo k trojnásobnému nárastu ako počtu tak i veľkosti častíc. Veľké špony neboli do analýzy započítané (obr. 20 a 21), a z obr. 20 je zrejmé, že vo zhlukoch dosahovali veľkosti v priemere až 0,5 mm. Z tohto rozboru je vidieť, že plátno mechanického filtru by malo byť vymenené skôr, než po troch mesiacoch, pretože stráca filtračnú účinnosť.

Tabuľka 5 Zrovnanie počtu a veľkosti častíc pre uvedené kvapaliny

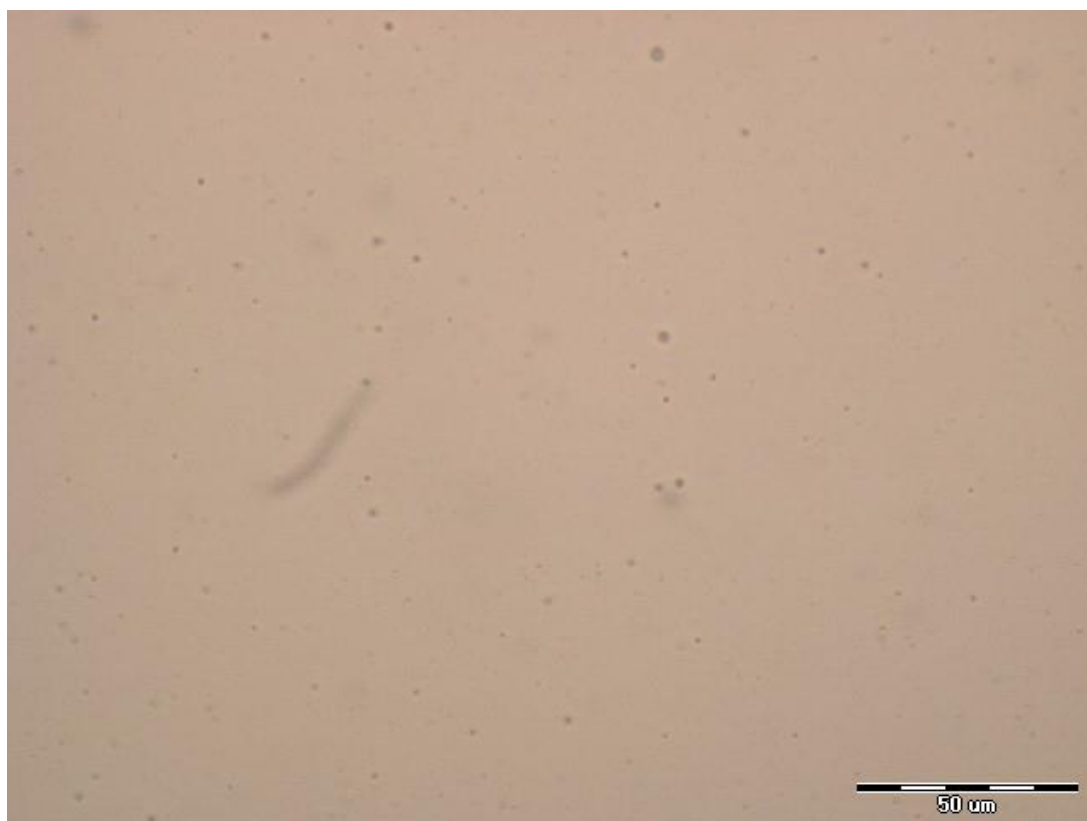
	A-ref	A-M1	A-M2
Veľkosť častíc [μm]	1,0–15,0	1,0-6,0	0,5-1,5
Relatívny počet častíc	46	434	151



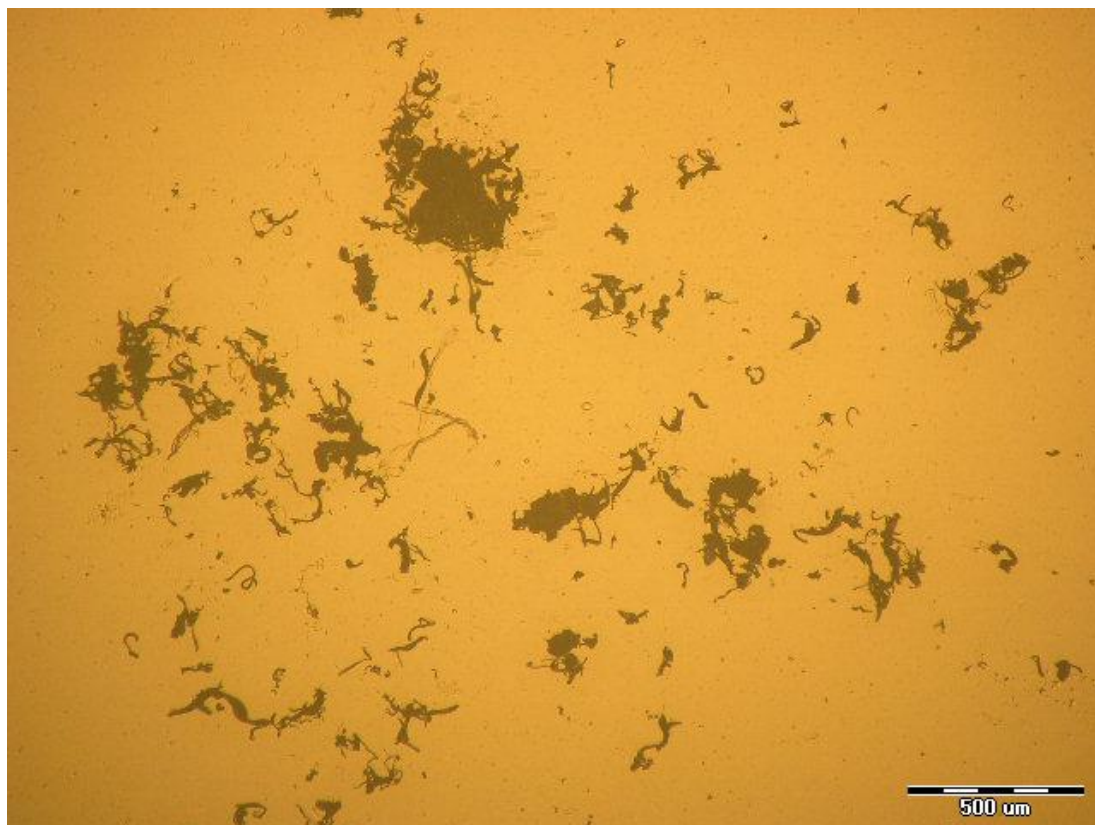
Obr. 17 Snímka dispergovanej olejovej fázy nachádzajúcej sa vo vzorke A-ref



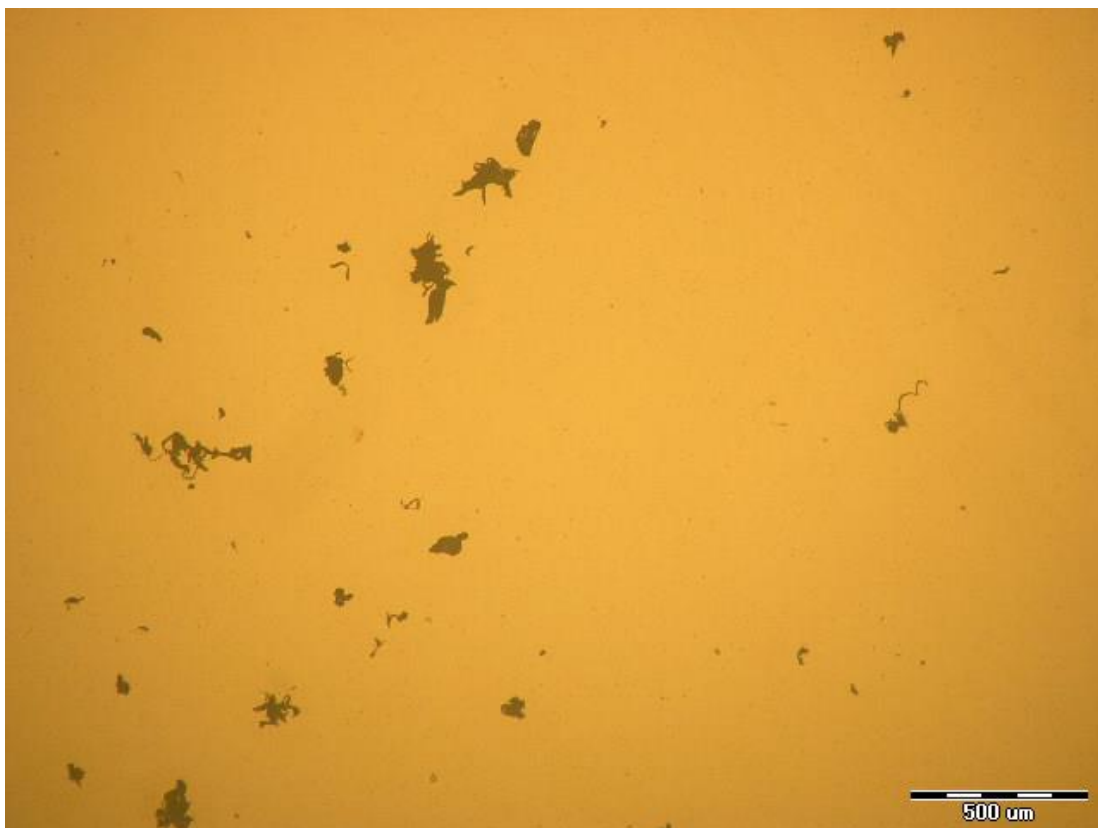
Obr. 18 Snímka kvapaliny A-M1 z výrobného procesu pred čistením



Obr. 19 Snímka kvapaliny A-ref z výrobného procesu po čistení



Obr. 20 Veľké zhluky špôn v kvapaline A-M1



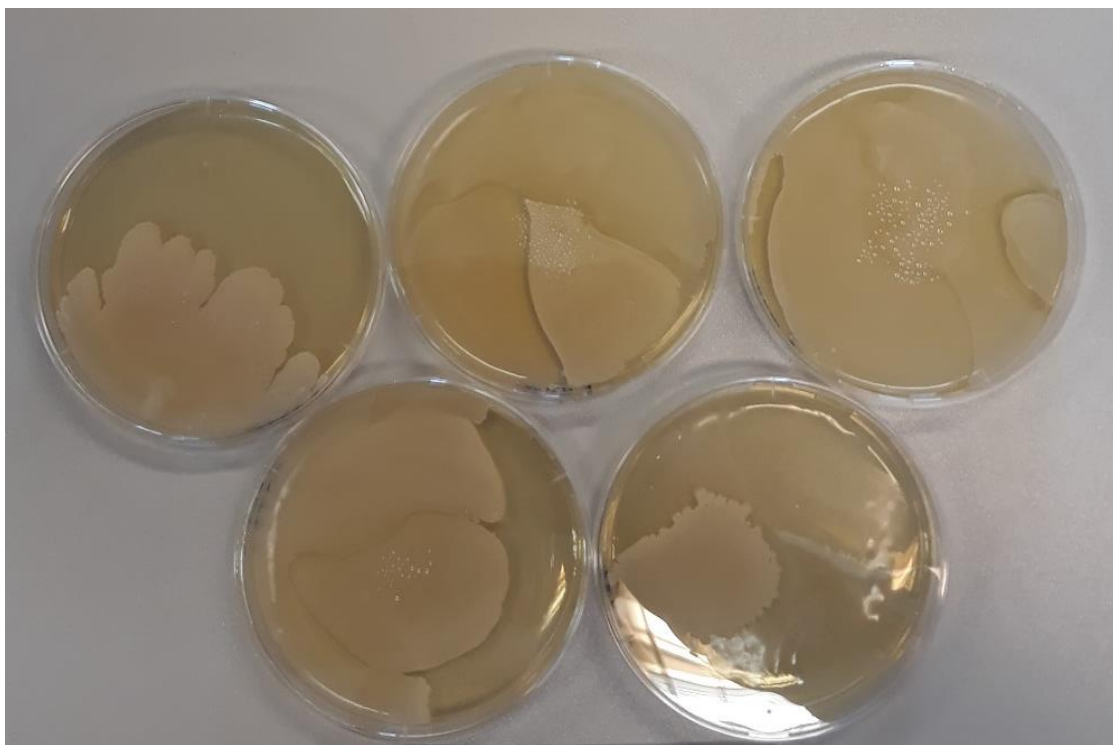
Obr. 21 Menšie špony v kvapaline A-M1

4.2 Mikrobiálny rozbor

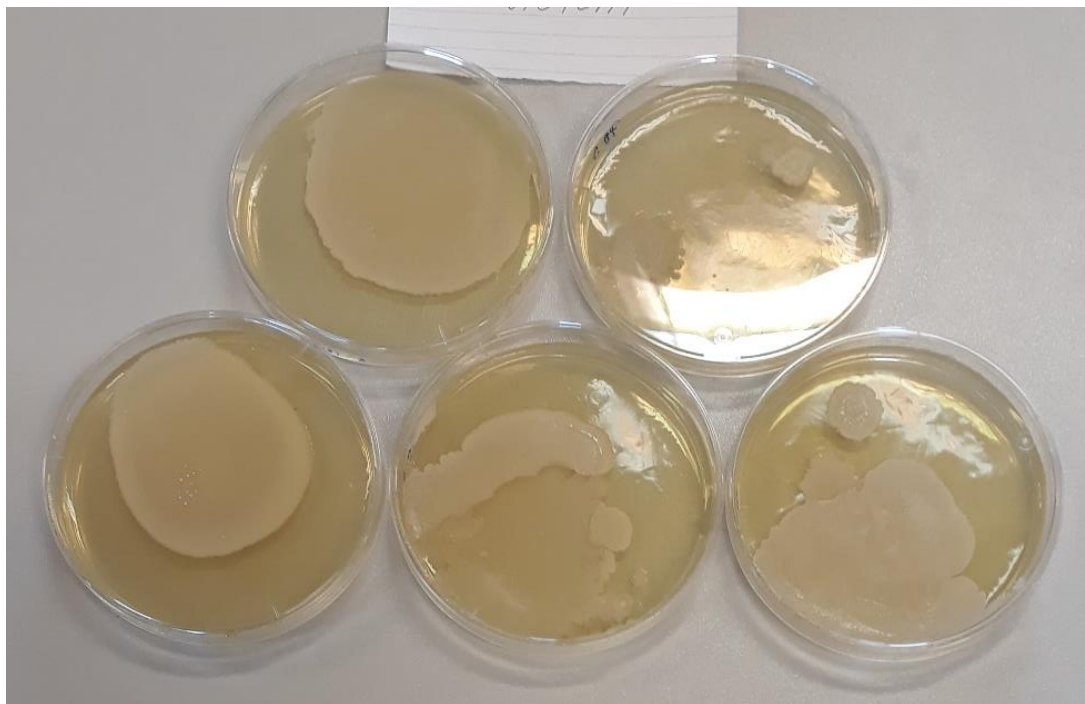
Čistá voda bola bakteriálne neaktívna – na kultivačnom médiu bolo pozorovaných pár „bodiiek“, ktoré možno priradiť baktériám. Rovnaký výsledok bol pozorovaný pre koncentrát A.

Rozbor preukázal veľké znečistenie chladiacej kvapaliny A-M1; na obr. 22 je zrejмый rozsah nárastu baktérií (57 %). Baktérie (anaeróbne a aeróbne) sa do chladiacej kvapaliny pravdepodobne dostali zo zvyškov potravín, cigariet a procesného odpadu.

Veľký nárast baktérií bol pozorovaný na kvapaline A-ref (obr. 23), ktorá bola odobraná po jednom dni procesu (47 %). Hrúbka bakteriálnej vrstvy A-ref bola nižšia v porovnaní so vzorkou A-M1 a tiež morfológia baktérií bola omnoho jemnejšia. Napriek tomu bol plošný výskyt baktérií nižší o 10%. Je možné, že čistenie rozvodových potrubí a celého systému chladiacej kvapaliny od mechanických nečistôt a iných nánosov nie je dostatočne efektívne, a preto môže stále obsahovať baktérie, predovšetkým v plátne mechanického filtra. Zdá sa ale, že veľký vplyv na znečistenie kvapaliny má aj tiež počet obrábacích strojov a tým pádom aj množstvo cirkulovanej procesnej kvapaliny v obeh.



Obr. 22 Mikrobiálna aktivita chladiacej kvapaliny A-M1



Obr. 23 Mikrobiálna aktivita chladiacej kvapaliny A-ref

4.3 Stanovenie obsahu nízkej koncentrácie olejov vo vode

Tabuľka 6 uvádza základné výsledky termogravimetrickej analýzy procesných kvapalín (A-M1, A-F, A-A) a 4% roztoku pôvodnej chladiacej kvapaliny (A-4). Úbytok hmotnosti do 100 °C (m_1), ktorý predstavuje prvý a hlavný rozkladný krok chladiacich kvapalín (obr. 24), v ktorom sa vyparuje predovšetkým voda, v sebe obsahuje taktiež prvý rozkladný krok pôvodnej emulzie chladiacej kvapaliny A (obr. 25). Tento úbytok predstavuje pre chladiacu kvapalinu A 28,8 %. Druhý úbytok hmotnosti označený ako m_2 v sebe zahrňuje tri ďalšie rozkladné kroky pôvodnej emulzie chladiacej kvapaliny A, ale u procesných kvapalín môže zahŕňať taktiež rozklad ďalších organických, ale i anorganických častíc, napr. baktérie. Posledný údaj označený aj ako „zvyšok“ predstavuje nerozložený podiel za podmienok merania, ktorý sa ale vždy rozložil pri ohreve na vzduchu. Pri pôvodnej emulzii chladiacej kvapaliny A činil tento krok 9 %.

Vzhľadom k tomu, že testované procesné kvapaliny boli pôvodne totožné s A-4, možno na základe zrovnania termogravimetrických výsledkov konštatovať, že nerozložený podiel vo všetkých procesných kvapalinách stúpol dvojnásobne a pre m_2 stúpol o 15–65 %. Tieto zmeny korešpondujú s poklesom m_1 . Je zrejmé, že určitý podiel nerozloženého podielu tvorí malé častice špôn (kvapalina bola pozorovaná okom a aj pod mikroskopom, obr. 20 a 21), ktoré nezachytili mechanické filtre procesu. Tieto sú však pre zachytenie pevných nečistôt veľmi účinné, pretože nerozložený podiel pre kvapaliny odobratej v marci pred (A-M1) a po čistení (A-ref) na mechanickom filtre bol rovnaký. Pozvoľný nárast m_2 v priebehu času cyklovania

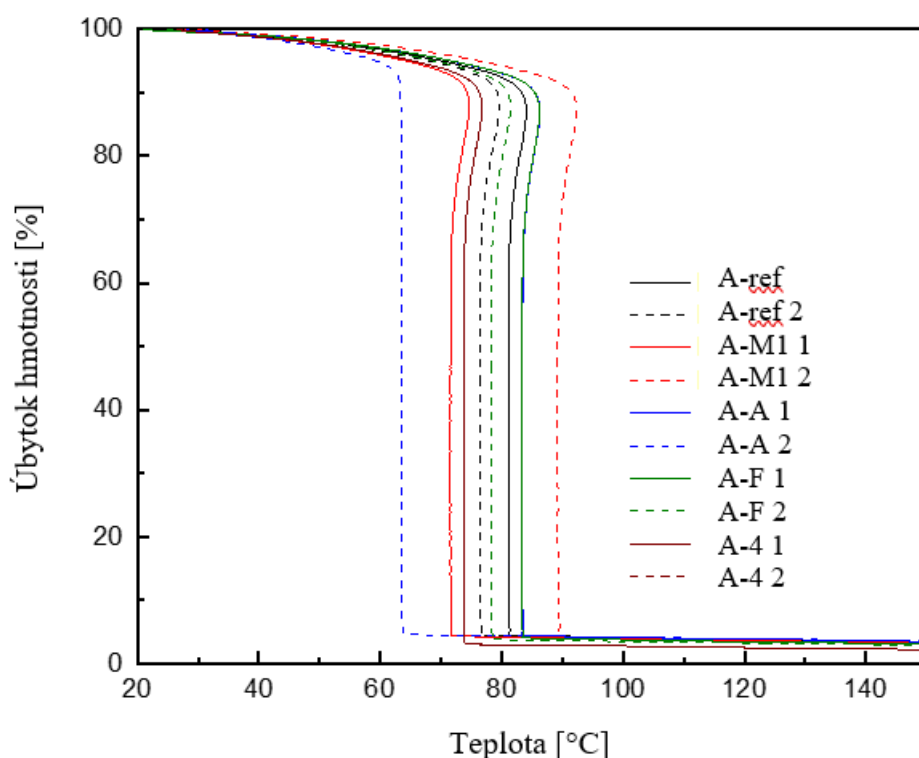
kvapaliny (v priemere o 1%) je pripísaný nárastu organického materiálu, ktorý do určitej miery tvoria baktérie a látky, z ktorých žijú. Tieto látky taktiež zvyšujú viskozitu kvapalín.

Široký rozsah teplôt (60-90 °C), pri ktorých dochádza k odparovaniu vody a k prvému rozkladnému kroku emulzie (m_1 , obr. 24) pre procesné kvapaliny (okrem A-4, ktorá má tento krok úplne totožný), je daný obsahom a typom nečistôt a do veľkej miery ich obsahom v odobratej vzorke, aj keď každá vzorka procesnej kvapaliny bola pred meraním veľmi dobre premiešaná. Rozsah teplôt sa zväčšuje s dobou cirkulácie kvapaliny v procese.

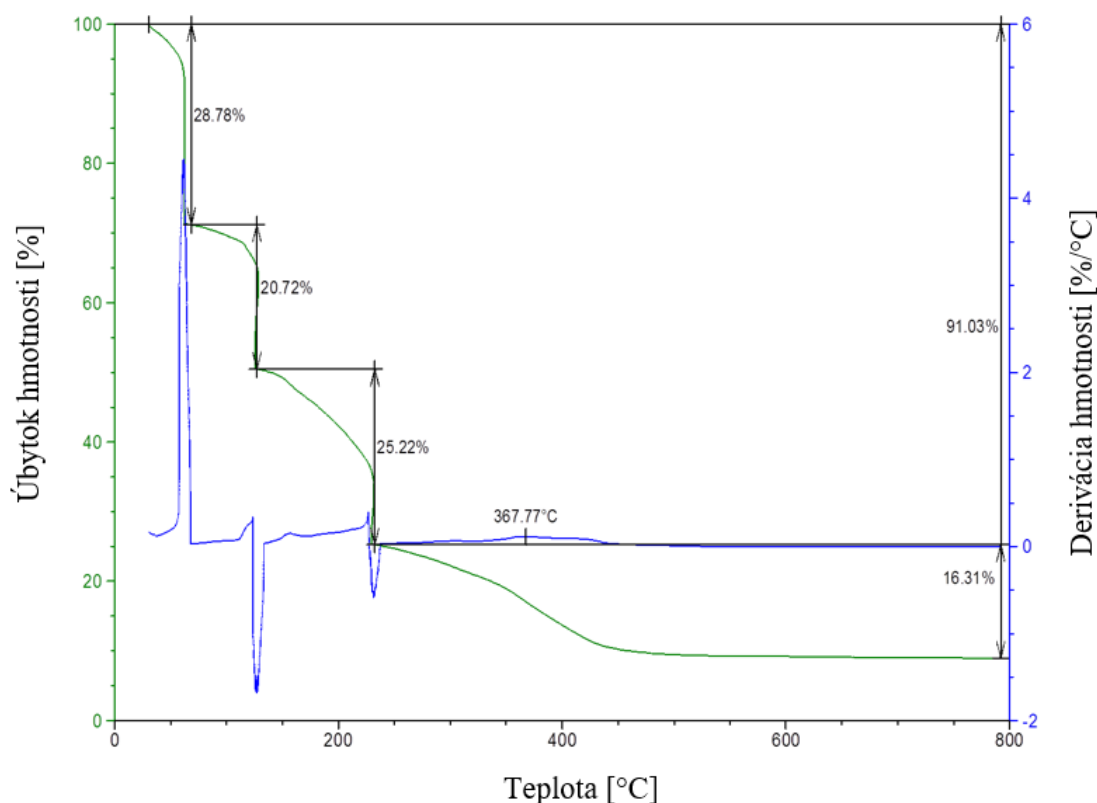
Pri obrábaní kovov dochádza ku zvýšeniu teploty a je veľmi pravdepodobné, že môže dosiahnuť teploty, pri ktorej dochádza k odparovaniu vody. Pokiaľ by teplota presiahla 120 °C je možné predpokladať, že dôjde k rozkladu olejovej fázy emulzie, čím sa znižuje jej účinnosť.

Tabuľka 6 Výsledky termogravimetrickej analýzy pre čistý roztok (A-4) a odoberaných vzoriek

Vzorka	A-4	A-F	A-M1	A-ref	A-A
m_1 [%]	97,2 (0,2)	96,4 (0,3)	95,9 (0,1)	95,6 (0,0)	95,7 (0,4)
m_2 [%]	2,4 (0,1)	2,9 (0,3)	3,4 (0,1)	3,7 (0,0)	3,5 (0,3)
Zvyšok [%]	0,4 (0,1)	0,7 (0,0)	0,7 (0,1)	0,8 (0,0)	0,8 (0,1)



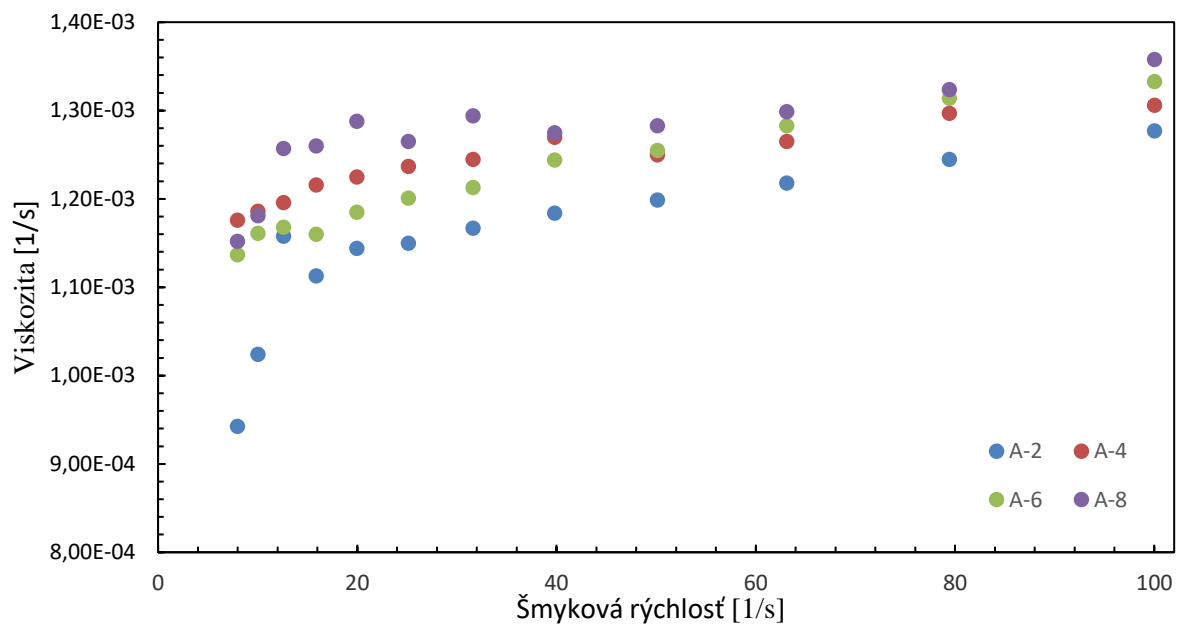
Obr. 24 Rozkladné krivky pre jednotlivé chladiace kvapaliny (meranie bolo prevedené pre dve vzorky z každej odobratej chladiacej kvapaliny)



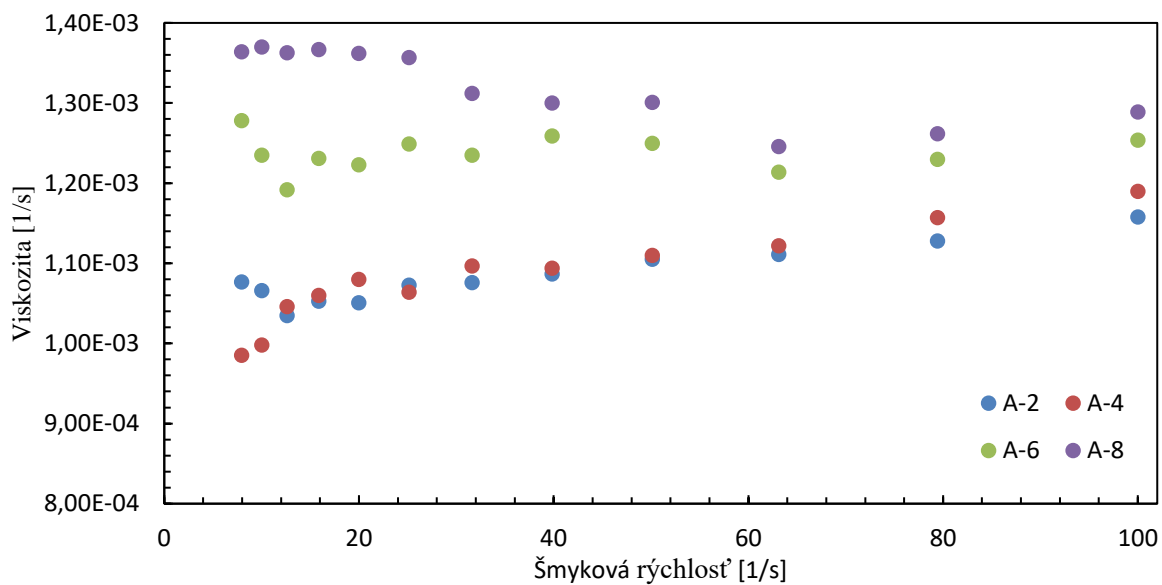
Obr. 25 Rozkladná krivka pôvodnej emulzie chladiacej kvapaliny s vyhodnotením rozkladných krokov (zelená krivka) a jej derivovaná krivka s vyhodnotením teploty rozkladu štvrtého rozkladného kroku (modrá krivka)

4.4 Stanovenie tokových vlastností emulzií

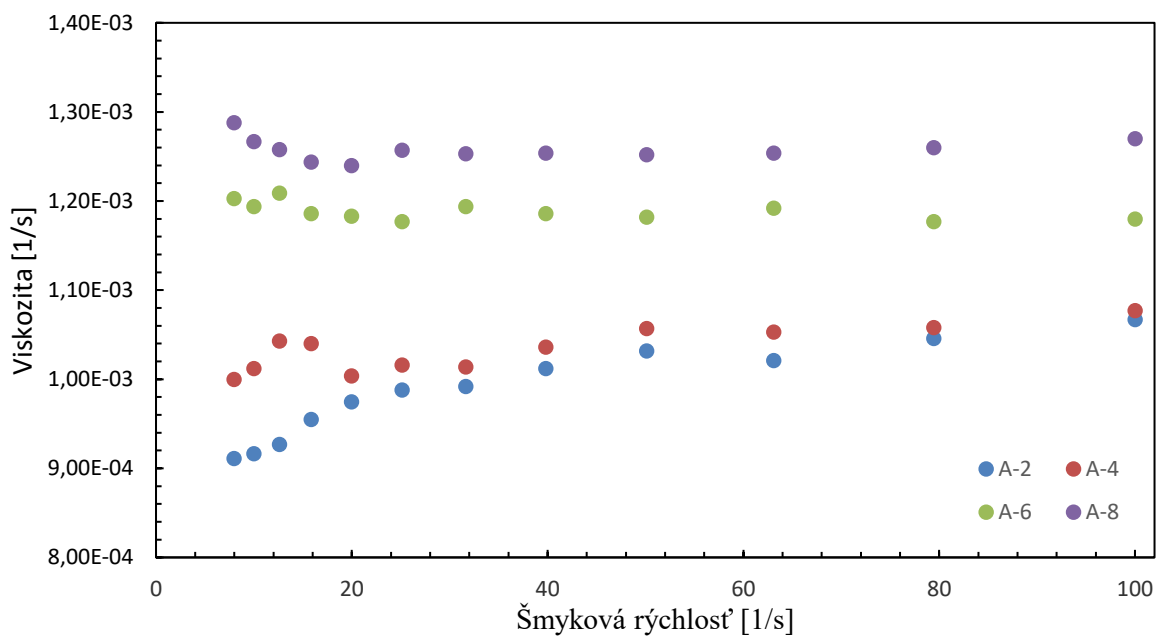
Tokové krivky 2–8% emulzií kvapaliny A sú pre teploty 25, 30, 35, 40, 45, a 50 °C uvedené na obr. 26–31. Z nich vyplýva, že hodnota viskozity so zvyšujúcou sa koncentráciou rastie. Rovnaký trend ale neplatí pre závislosť na šmykovej rýchlosti. S rastúcou teplotou a súčasne s rastúcou šmykovou rýchlosťou sa mení predovšetkým vnútorná štruktúra vzoriek A-6 a A-8. Pri teplote 30 °C dochádza ku šmykovému zriedeniu i šmykovému spevneniu (mierny nárast i pokles viskozity), pri 40 °C iba pre vzorku A-8. Pri teplote 30 °C sa ale obe kvapaliny chovali Newtonovsky (viskozita sa so šmykovou rýchlosťou nemenila), pri 45 °C iba vzorka A-8. Súčasne je tiež vidieť, že sa líši v reologickom chovaní kvapalina A-2, ktorá má vždy najnižšiu viskozitu a rozdiel v jej viskozite v porovnaní s ostatnými vzorkami rastie s teplotou. U zvyšných vzoriek sa viskozita líši takto: s rastúcou teplotou je podobná pre dvojicu kvapalín A-2 a A-4 (30 °C a 35 °C), A-4 a A-6 (45 °C). Pri teplote 50 °C nadobúda viskozita pre roztoky A-4, A-6 a A-8 podobné hodnoty.



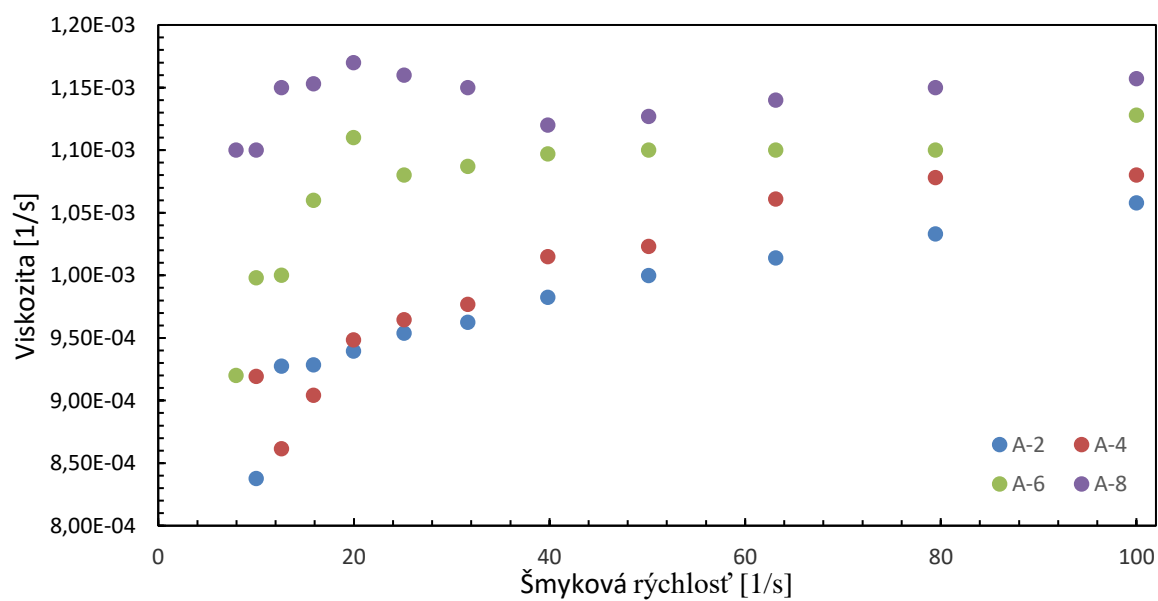
Obr. 26 Závislosť viskozity na šmykovej rýchlosti pre vzorky A-2, A-4, A-6, A-8 pri teplote 25 °C



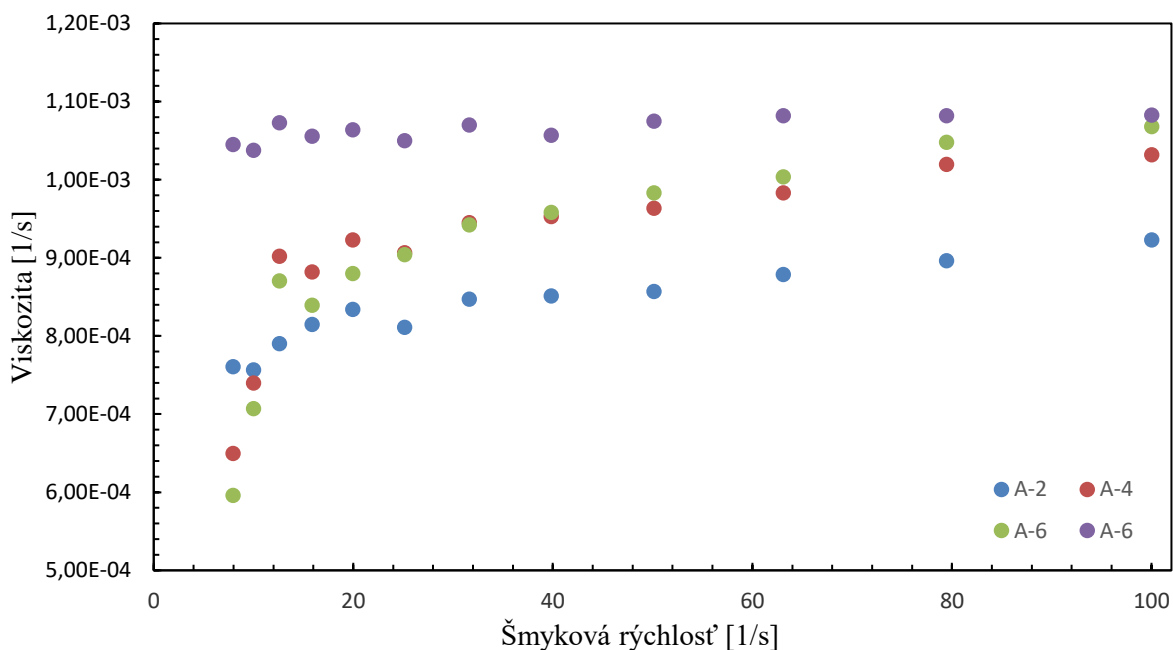
Obr. 27 Závislosť viskozity na šmykovej rýchlosti pre vzorky A-2, A-4, A-6, A-8 pri teplote 30 °C



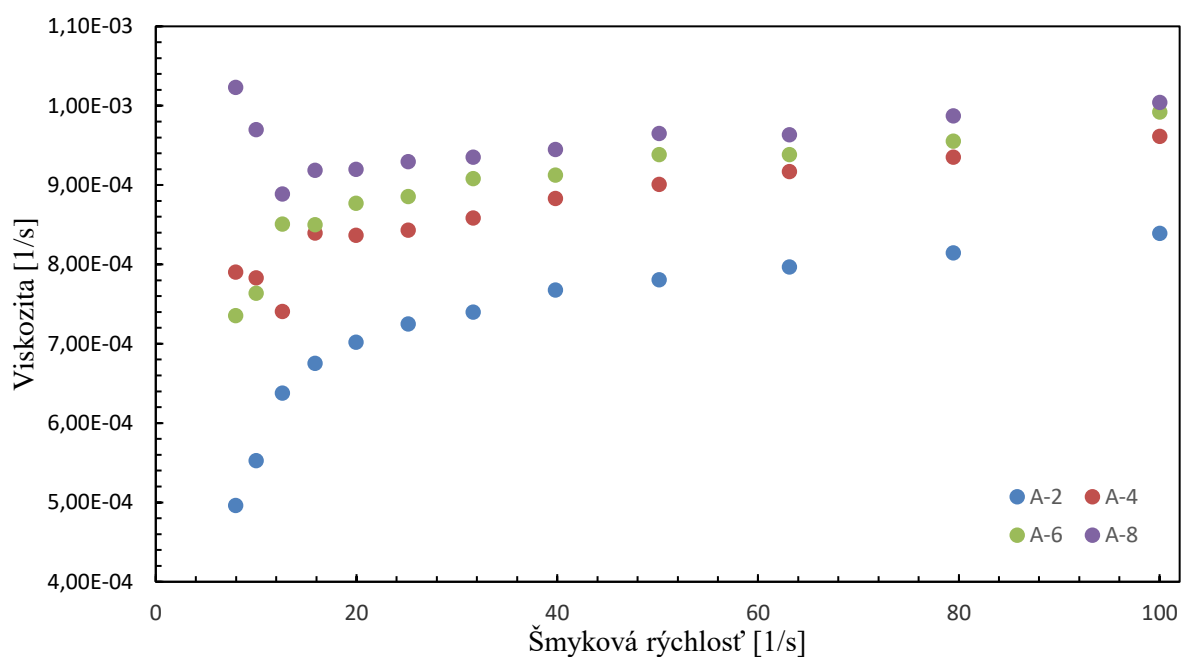
Obr. 28 Závislosť viskozity na šmykovej rýchlosti pre vzorky A-2, A-4, A-6, A-8 pri teplote 35 °C



Obr. 29 Závislosť viskozity na šmykovej rýchlosti pre vzorky A-2, A-4, A-6, A-8 pri teplote 40 °C

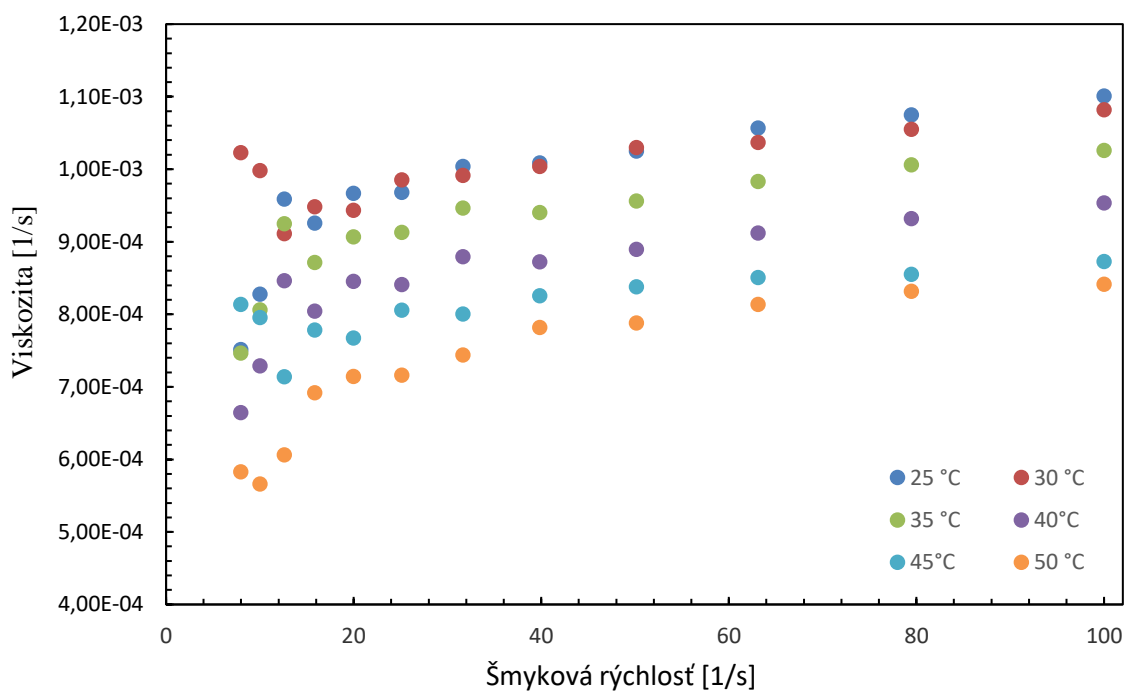


Obr. 30 Závislosť viskozity na šmykovej rýchlosti pre vzorky A-2, A-4, A-6, A-8 pri teplote 45 °C

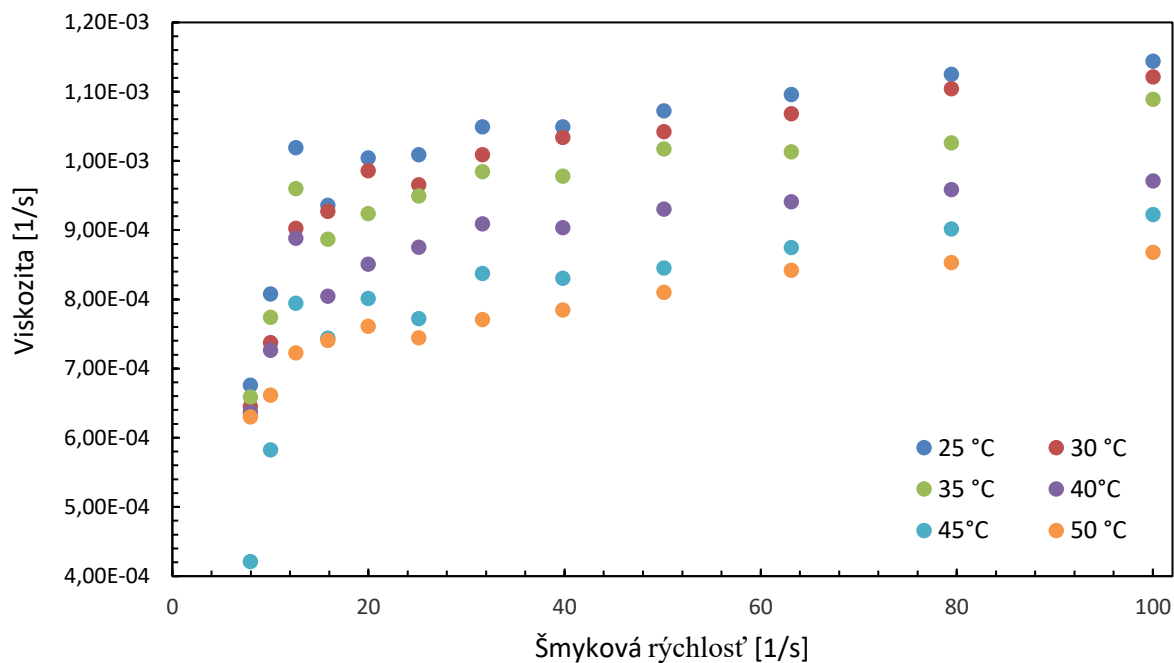


Obr. 31 Závislosť viskozity na šmykovej rýchlosti pre vzorky A-2, A-4, A-6, A-8 pri teplote 50 °C

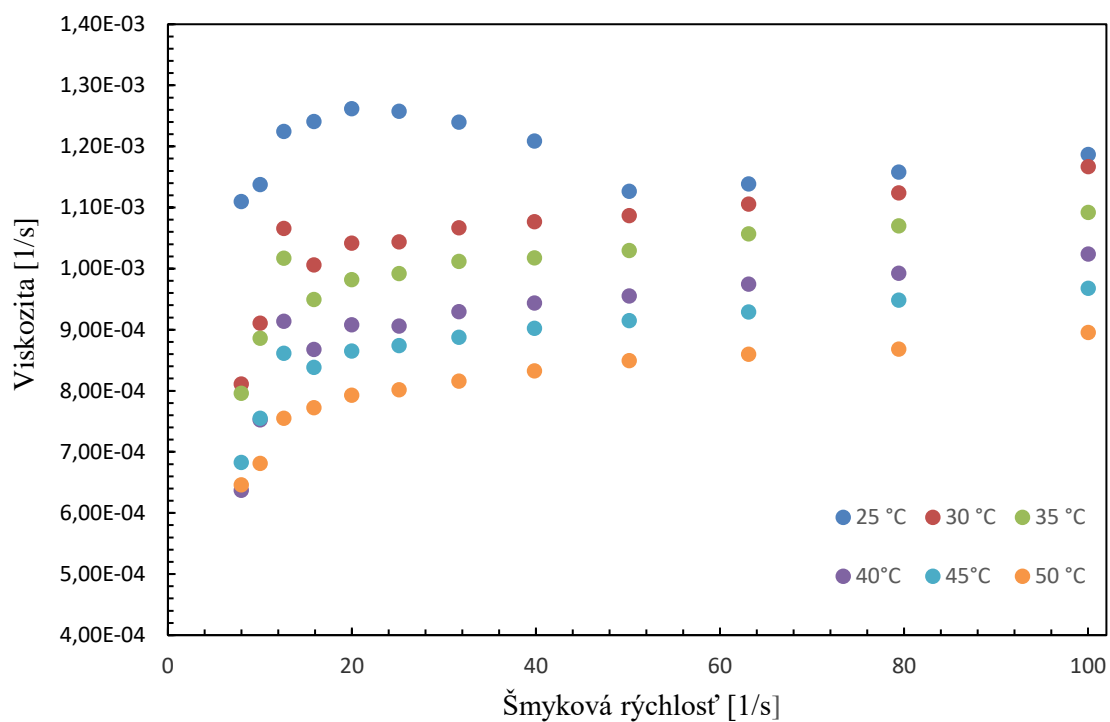
Emulzie kvapaliny B mali vždy nižšiu hodnotu viskozity než emulzie kvapaliny A. Viskozita opäť rástla s koncentráciou a klesala s rastúcou teplotou, ale s rastúcou šmykovou rýchlosťou vždy mierne rástla (dochádzalo ku šmykovému spevneniu). Tokové krivky kvapalín sú pre jednotlivé koncentrácie a rôzne teploty uvedené na obrázkoch 32–35.



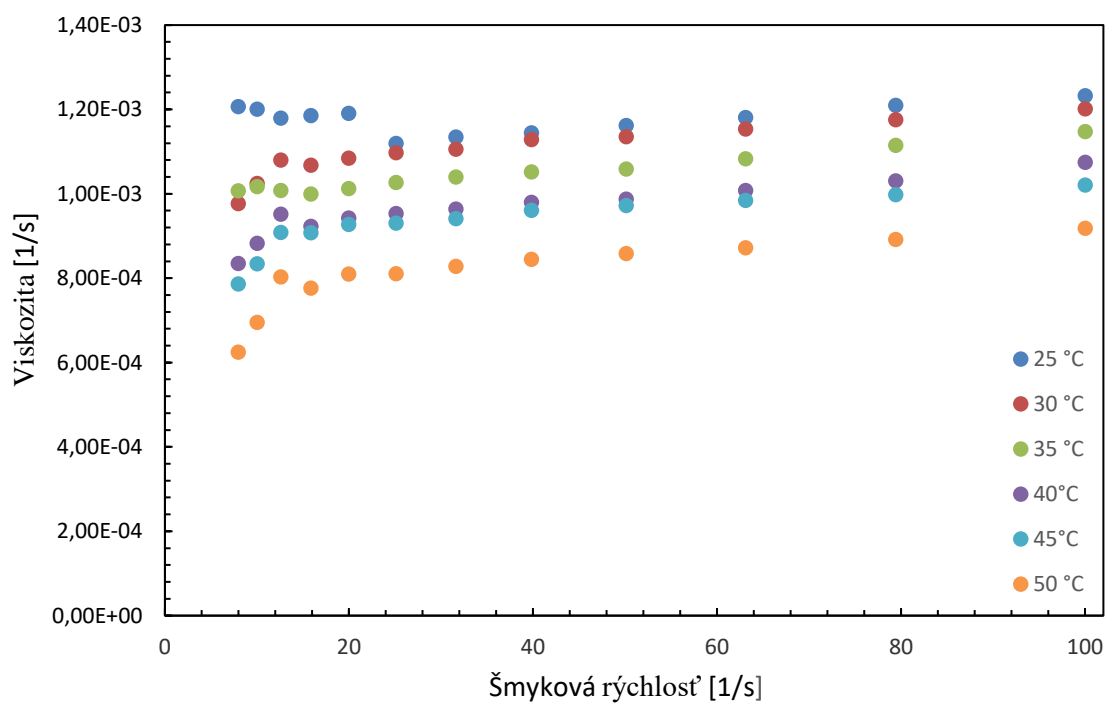
Obr. 32 Závislosť viskozity na šmykovej rýchlosti pre vzorky B-2 pri jednotlivých teplotách



Obr. 33 Závislosť viskozity na šmykovej rýchlosti pre vzorky B-4 pri jednotlivých teplotách

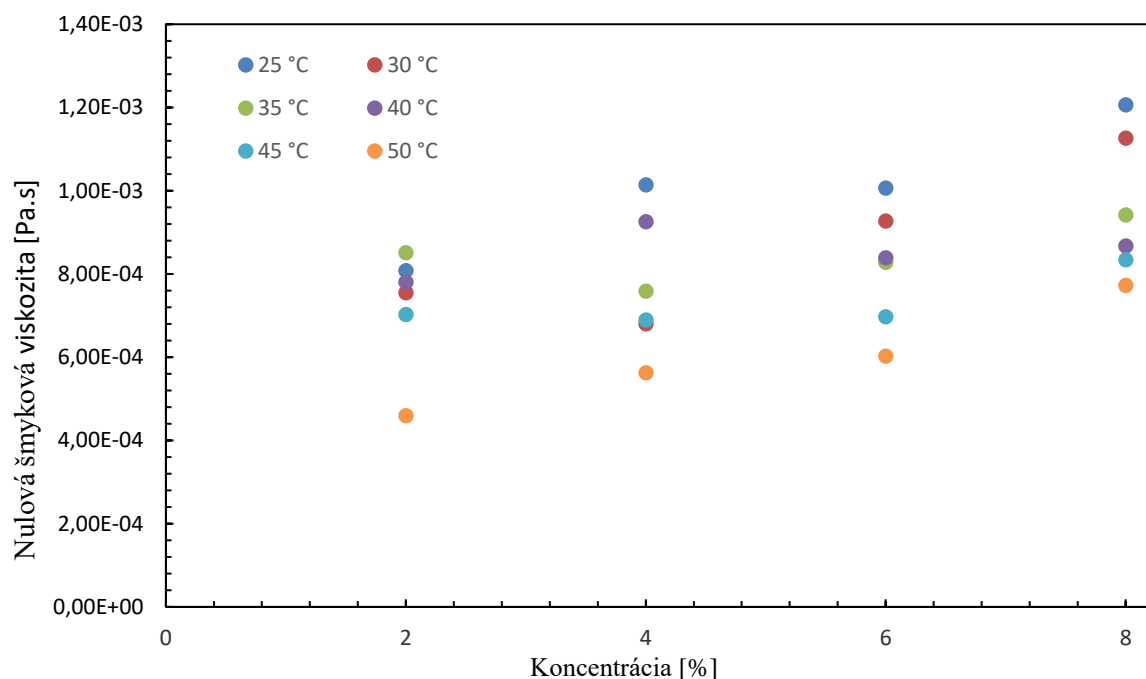


Obr. 34 Závislosť viskozity na šmykovej rýchlosti pre vzorky B-6 pri jednotlivých teplotách

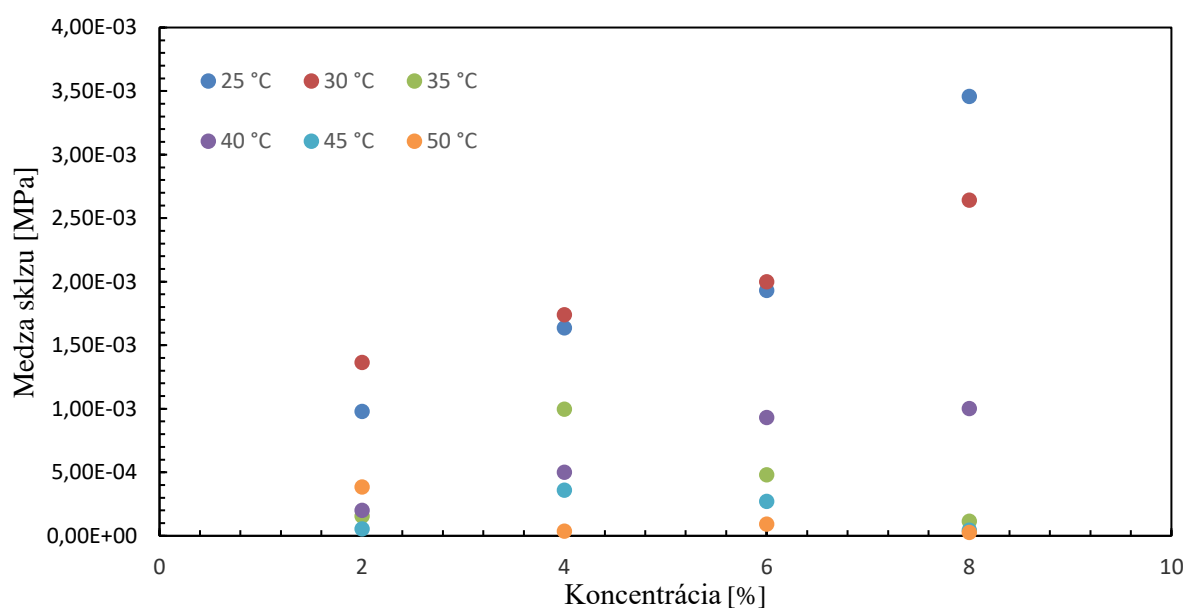


Obr. 35 Závislosť viskozity na šmykovej rýchlosti pre vzorky B-8 pri jednotlivých teplotách

Vzhľadom k tomu, že viskozita väčšiny meraných roztokov so zvyšujúcou sa šmykovou rýchlosťou mierne rástla, boli tokové krivky vyhodnotené modelom Heschel-Bulkley. Z tohto modelu bola vyhodnotená nulová viskozita a medza sklzu. Ich hodnoty sú pre oba typy kvapalín vynesené v závislosti na koncentrácii a teplote na obr. 36 a 37. Pre kvapaliny A je zrejмый trend nárastu nulovej šmykovej viskozity s koncentráciou, i keď medzi najnižšou a najvyššou koncentráciou pri každej teplote dochádza k vychýleniu viskozity. Medza sklzu rastie u každej koncentrácie s teplotou, ale s rastúcou koncentráciou rastie iba u teploty 25, 30 a 40 °C, pri 45°C rastie do plata, u 50 °C mierne klesá a opäť rastie.



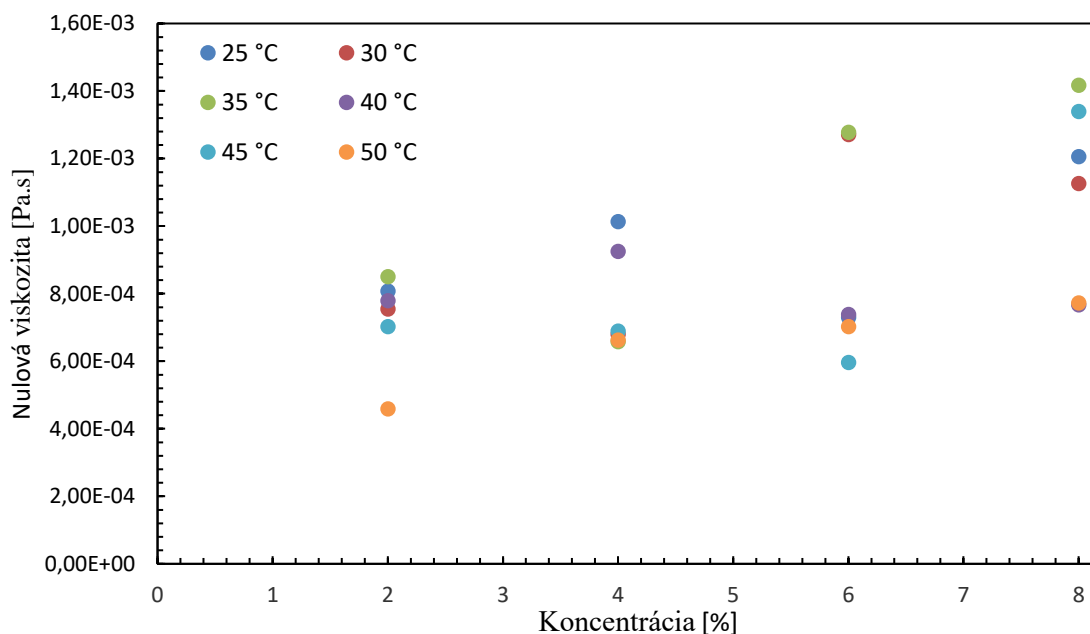
Obr. 36 Nulové viskozity pre chladiacu kvapalinu A



Obr. 37 Medze sklzu pre chladiacu kvapalinu A

Nulová šmyková viskozita emulzií roztoku B vykazovali väčší rozptyl hodnôt v porovnaní s chladiacou kvapalinou A, pričom najväčšiu odchýlku vykazovali roztoky B-4 a B-6, kedy viskozita neklesala kontinuálne s teplotou.

I keď všetky tokové krivky emulzie B vykazovali mierny nárast viskozity so šmykovou rýchlosťou a k vyhodnoteniu bol použitý model Heschel-Bulkley, nie je pre tento typ vhodný, pretože medza sklzu vykazovala u polovice vzorku záporné hodnoty. Z hľadiska tokového chovania sa teda jedná o iný typ kvapaliny než je kvapalina A.



Obr. 38 Nulové viskozity pre chladiacu kvapalinu A

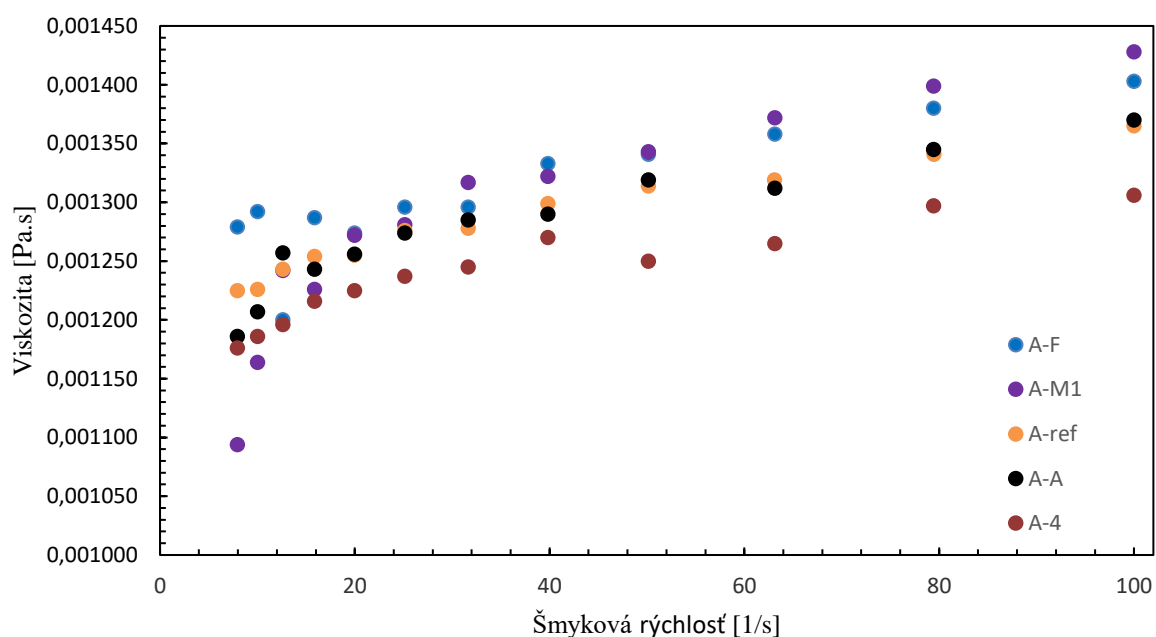
Pre oba typy emulzií je ale z procesného hľadiska zmena viskozity s koncentráciou a teplotou nevýznamná.

Zo získaných tokových kriviek (obr. 39 a 40), kedy dochádzalo k šmykovému spevneniu, ktoré nie je významné, možno vyhodnotiť procesné kvapaliny ako ne-Newtonovské, (vplyvom šmykovej rýchlosti dochádzalo k zmene vnútornej štruktúry). Viskozita procesných kvapalín sa líšila v závislosti na miere znečistenia. Najnižšiu viskozitu vykazoval pôvodný roztok chladiacej kvapaliny, najvyššia hodnota bola pre vzorku odobratú v marci, nakoľko sa jednalo o najviac znečistenú kvapalinu (v procese nastala nutnosť výmeny kvapaliny). Ako už bolo preukázané, tieto kvapaliny obsahovali vyšší podiel cudzorodých látok, ktorými boli špony, prachové nečistoty, baktérie, pravdepodobne zvyšky potravy a odpad.

Toková krivka čistej procesnej kvapaliny (A-ref) nebola totožná s tokovou krivkou kvapaliny A-4, ako by sa predpokladalo (obr. 31). Z toho vyplýva, že už po jednom dni procesu systému, je už kvapalina znečistená. Svedčí o tom taktiež vysoká biologická aktivita (kap. 4.2). Zmena tokových vlastností aj keď je nízka, môže byť spôsobená tým, že povrchovo

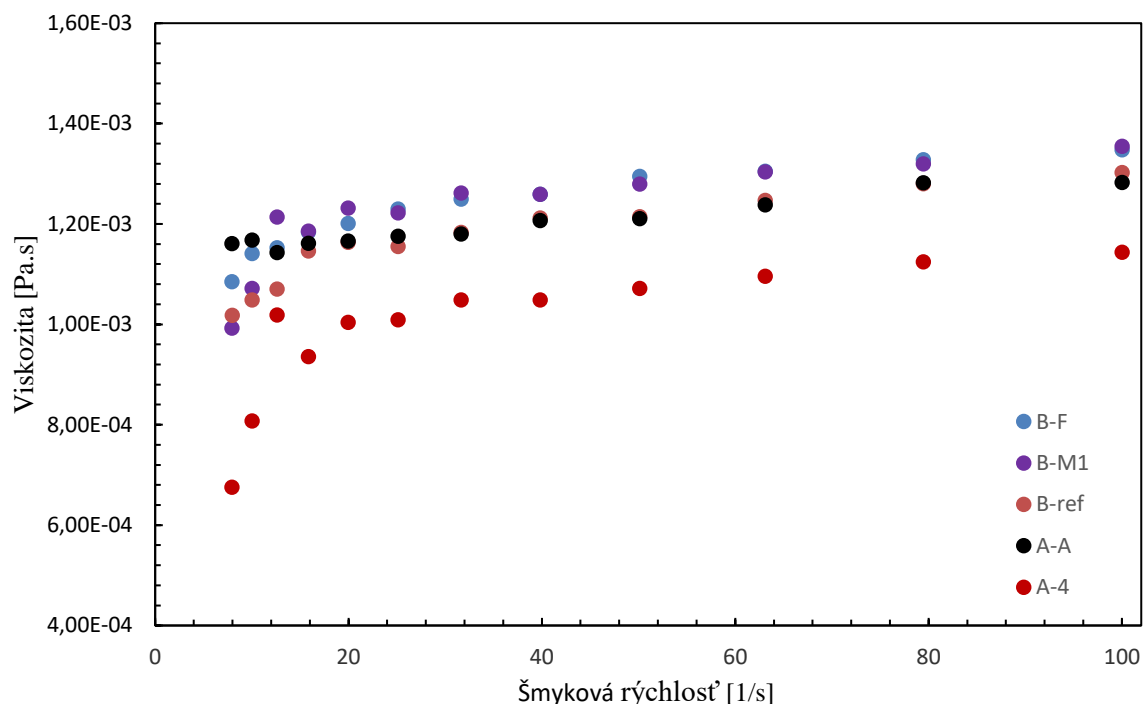
mechanické filtre odstraňujú iba hrubé nečistoty, nie však organický podiel v podobe bakteriálnej kontaminácie, ktorá v danej kvapaline naďalej prebýva.

Vplyv na výsledné meranie môže mať aj miesto odberu a intenzita výroby. Pri vyššom počte strojov čo predstavuje aj celkovú vyššiu produkciu dochádza k tomu, že životnosť a kondícia kvapaliny je predlžovaná vplyvom turbulentnejšieho a rýchlejšieho toku v centrálnom zariadení kvapaliny.



Obr. 39 Tokové krivky chladiacej kvapaliny A v porovnaní s čistým roztokom chladiacej kvapaliny

Z tokových kriviek procesných kvapalín B (obr. 40) je vidieť, že viskozita so šmykovou rýchlosťou mierne rastie (menej než pre procesné kvapaliny A) a rozdiel vo viskozite medzi jednotlivými odbermi je veľmi nízky. Viskozita procesných kvapalín má ale vždy vyššiu hodnotu s porovnaním so vzorkou B-4. Dôvodom je opäť rýchle procesné znečistenie pri výmene procesnej kvapaliny. Miera znečistenia kvapaliny B je mierne nižšie než pre kvapaliny A.



Obr. 40 Tokové krivky chladiacej kvapaliny B v porovnaní s čistým roztokom chladiacej kvapaliny

Rýchle procesné testy kvapaliny A ukázali, že s mierou znečistenia nedošlo ku zmene pH, refrakčného indexu ani k obsahu chloridov (tabuľka 7). Všetky zmienené parametre boli v rozsahu predpísaných procesných limitov. Z tohto hľadiska by mala kvapalina vyhovovať nárokom procesu. Napriek tomu vo výrobe dochádza k problémom v zmysle zvýšenej korózie obrobku a ku kožným chorobám obsluhy, ktorá prichádza do priameho kontaktu s chladiacou kvapalinou. Všetky prevedené testy vedú k záveru, že problémy spôsobuje organické znečistenie kvapaliny. Nepredpokladá sa, že by došlo k rozkladu olejovej zložky emulzie, ale jej účinnosť sa podľa miery znečistenia mení.

Tabuľka 7 Výsledné procesné hodnoty pre kvapalinu A

	pH	Refraktometrická hodota	Chloridy
Február	9,0	4,3	79,5
Marec	9,0	4,5	81,0
Apríl	9,0	4,6	80,4

5. ZÁVER

Premerané boli dva typy chladiacej kvapaliny používané pri obrábaní kovov. Merané boli tokové vlastnosti, mikrobiálna aktivita a obsah aditív. Procesné kvapaliny boli odoberané v intervale jedného mesiaca počas jedného úžitkového cyklu. Študovaný bol tiež vplyv koncentrácie a teploty na čisté (pôvodné) chladiace kvapaliny označené A a B (jedná sa o emulziu minerálnych olejov).

Všetky kvapaliny preukázali ne-Newtonovské správanie – s rastúcou šmykovou rýchlosťou došlo k miernemu nárastu viskozity, pričom tento nárast bol vyšší pre kvapaliny A (ako čistejšie, tak procesnejšie). Reologické dáta boli zhodnotené modelom Heschel-Bulkley. Pre procesné kvapaliny typu A rástla viskozita s mierou znečistenia. To bolo spôsobené prítomnosťou jednak pevných častíc (špony, prach), tak baktériami. Viskozita procesných kvapalín typu B sa medzi sebou takmer nelíšila. Viskozita oboch typov procesných kvapalín bola vždy vyššia než pôvodná chladiaca kvapalina. Z výsledkov pre kvapalinu A plynie, že ku znečisteniu čistejšie kvapaliny vo výrobe dochádza už po jednom dni, kedy dochádza predovšetkým k výraznému nárastu bakteriálnej aktivity. Jedným zo zdrojov tohto znečistenia sú látkové filtre, ktorými kvapalina prechádza v procese, a ktoré primárne slúžia k zachyteniu pevných nečistôt (predovšetkým špon z obrábania). Zmena viskozity tiež naznačuje, že ku znečisteniu kvapaliny A dochádza kontinuálne s dobou používania, u kvapaliny B tento trend spozorovaný nebol.

Tokové krivky čistých emulzií oboch typov kvapalín preukázali rovnaký trend, a to nárast viskozity s rastúcou koncentráciou a pokles viskozity s rastúcou teplotou. Rozdiel bol v tom, že u kvapaliny B viskozita vždy mierne rástla s rastúcou šmykovou rýchlosťou, u kvapaliny A sa však menila s teplotou pre koncentráciu 6 a 8 %. Tiež dochádzalo k zmene vnútornej štruktúry, pretože dochádzalo ku šmykovému spevneniu a rovnako tak ku šmykovému zriedeniu. Pri teplotách 30, 35 a 40 °C kvapaliny B vykazovali Newtonovské chovanie.

Čo sa týka znečistenia procesnej kvapaliny, bolo zistené, že najviac nečistôt tvorí organický podiel, ktorého obsah sa zvýšil o 1% a o polovicu menej tvoria veľmi pravdepodobne špony (nerozložený podiel pri ohreve do 800 °C, nárast o 0,4 %). Na kvalitu procesnej kvapaliny má vplyv taktiež teplota dosiahnutá pri obrábaní. Pokiaľ dosahuje 120 °C, začne sa rozkladať minerálny olej v chladiacej kvapaline.

Zdá sa, že problémy ktoré hlási proces, ako je sporadický výskyt korózie výrobkov a časté kožné problémy obsluhy, ktorá príde do priameho styku s kvapalinou, sú zapríčinené jednak zriadením chladiacej kvapaliny, tak zvýšením množstva baktérií. Pokles účinnosti z dôvodu zníženej koncentrácie minerálnych olejov by mohla postihnúť kontrola merania refraktometrického indexu. Zvýšený výskyt baktérií (tvorí 2/3 znečistenia), je potrebné kontrolovať ešte iným testom než zavedenými procesnými testami.

6. POUŽITÁ LITERARÚRA

- [1] TRENT, E. M. a Paul Kenneth WRIGHT. *Metal cutting*. 4th ed. Boston: Butterworth-Heinemann, c2000. ISBN 07-506-7069-X.
- [2] KAČMÁR, Miroslav a Peter DOBEŠ. Súčasné trendy v oblasti kvapalín pre obrábanie kovov. In: *TRIBOTECHNIKA* [online]. Žilina: TechPark [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-42010/fuchs.html>
- [3] ČILLIKOVÁ, Mária, Jozef PILC a Dana STANČEKOVÁ. *Rezné kvapaliny a ich aplikácie*. Žilina: EDIS - vydavateľstvo ŽU, 2005. ISBN 80-8070-428-7.
- [4] BUDA, Ján a Ján BÉKÉŠ. *Teoretické základy obrábania kovov*. 2. vydanie. Bratislava: Alfa, 1977.
- [5] KOCMAN, Karel. *Aktuální příručka pro technický úsek*. Praha: Verlag Dashöfer, 2001. ISBN 80-902-2472-5.
- [6] AKBARI, Sweeta a Abdurahman Hamid NOUR. Emulsion types, stability mechanisms and rheology: A review. *International Journal of Innovative Research and Studies*. 2018, **1**(1), 14-21. ISSN 2319-9725.
- [7] DÁLIK, Peter. S vodou miešateľné obrábacie kvapaliny - teória a prax - 1. časť. In: *TRIBOTECHNIKA* [online]. Žilina: TechPark, 2012 [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-42012/s-vodou-miesatelne-brabacie-kvapaliny-teoria-a-prax-1-cast.html>
- [8] KOCMAN, Karel. *Technologie obrábění*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. ISBN 80-214-3068-0.
- [9] STACHOWIAK, G. W. a A. W. BATCHELOR. *Engineering tribology: Lubricants and their composition*. New York: Elsevier, 1993. ISBN 978-044-4892-355.
- [10] ROMAN, Radovan. Najčastejšie problémy vodouriediteľných chladiacich kvapalín, ich príčiny a osvedčené riešenia. In: *TRIBOTECHNIKA* [online]. Žilina: TechPark [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-32009/najcastejsie-problemy-vodourieditelných-chladiacich-kvapalin-ich-priciny-a-osvedcene-riesenia.html>
- [11] DÁLIK, Peter. S vodou miešateľné obrábacie kvapaliny. In: *TRIBOTECHNIKA* [online]. Žilina: TechPark, 2013 [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-22013/s-vodou-miesatelne-obrabacie-kvapaliny-.html>
- [12] BURANSKÁ, Eva. Manažment rezných kvapalín. In: *Recenzovaný zborník z medzinárodnej vedeckej konferencie*. Žilina: STRIX, 2017, s. 7. ISBN 978-80-89753-17-8.
- [13] ROMAN, Radovan. Meranie základných parametrov vodou riediteľných kvapalín v prevádzke. In: *TRIBOTECHNIKA* [online]. Žilina: TechPark, 2011 [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-32011/meranie-zakladnych-parametrov-vodou-rieditelných-kvapalin-v-prevadzke.html>
- [14] BARNES, Howard A. *A HANDBOOK OF ELEMENTARY RHEOLOGY*. Wales: Cambrian Printers, 2000. ISBN 0-9538032-0-1.
- [15] DE VICENTE, Juan. *Rheology*. Croatia: InTech, 2012. ISBN 978-953-51-0187-1.

- [16] HOLUBOVÁ, Renata. *Základy reologie a reometrie kapalin*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2014, s. 50. ISBN 978-80-244-4178-8.
- [17] *Viskozita* [online]. Technická Univerzita v Liberci [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: <https://nanoed.tul.cz/pluginfile.php/689/course/section/1112/TNA%20Viskozita.pdf>
- [18] Reologie [online]. Ústav fyziky a materiálového inženýrství Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_03.pdf
- [19] Měření tokových vlastností [online]. Ústav fyziky a materiálového inženýrství Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně. [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/fyzika_pol/FP_05.pdf
- [20] *Základy reologie a reometrie kapalin* [online]. Masarykova univerzita Brno [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/1431/podzim2014/C5160/um/2457585/2457594/Reologie_a_reometrie_kapalin.pdf
- [21] JANALÍK, J. *Viskozita tekutin a její měření*. Ostrava: VŠB TU Ostrava, 2010, ISBN 13-978-0195154-51-1
- [22] ÚSTAV CHEMICKÝCH A HYDRAULICKÝCH STROJOV A ZARIADENÍ Strojnícka fakulta STU v Bratislave [online]. [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: <http://docplayer.gr/30942714-Procesne-strojnictvo-kapitola-3.html>
- [23] SCHRAMM, G. *A Practical Approach to Rheology and Rheometry*. 2nd Edition. Karlsruhe: Gebrueder HAAKE, 2000, ISBN 0.0.010.2–1998 II.
- [24] HYUN, Kyu, Manfred WILHELM, Christopher O. KLEIN, et al. A review of nonlinear oscillatory shear tests: Analysis and application of large amplitude oscillatory shear (LAOS). *Progress in Polymer Science*, 2011, 36(12), 1697-1753
- [25] TA INSTRUMENTS. *AR & ARES Rheometer Certified User Course I Theory*. USA, 2006.
- [26] ARJAY ENGINEERING. *A Guide to Oil in Water Monitoring for Environmental Compliance*. Kanada, 2014. Dostupné také z: <https://www.arjayeng.com/wp-content/uploads/2017/02/Guide-to-Oil-in-Water-Monitoring-2014.pdf>
- [27] QUAKER. *QUAKERCOOL® 3601 H: Vodou riaditeľná polysyntetická chladiaca kvapalina na obrábanie kovov*. Slovenská republika, 2017.
- [28] QUAKER. *QUAKERCOOL® 3520 H: Vodou riaditeľná polysyntetická chladiaca kvapalina na obrábanie kovov*. Slovenská republika, 2017.